AALBORG UNIVERSITET
KØBENHAVN

Aalborg Universitet København
A. C. Meyers Vænge 15
2450 København SV
Danmark

Sekretær: Lene Wenstrøm Jørgensen
Telefon: 99 40 97 34
Lene Wenstrøm Jørgensen

Studenterrapport

Uddannelse:
Master i Bygningsfysik

Semester:
4. semester

Titel på projekt:
Energirenovering af parcelhuse fra 1960'erne og 1970'erne
I et totaløkonomisk perspektiv

Projektperiode:
Primo februar til primo juni 2022

Vejleder:
Kim B. Wittchen og Kim Haugbølle

Projektgruppenr.:
Selvstændigt arbejde

Medlemmer:
Andreas Ladefoged

Antal normalsider:
60 sider

Afleveringsdato:
9. juni 2022

Resumé:
Nærværende rapport har til formål at beskrive, hvilke energirenoveringstiltag, der kan anvendes til at bringe et parcelhus fra 1971 i renoveringsklasse 1 og 2 jf. bygningsreglementet §§ 280-281, samtidigt med at de kan udføres bygningsfysisk forsvarligt. Derudover er formålet at belyse, hvilken effekt det har på energibehovet at anvende andre temperaturer indendørs end den standardiserede temperatur. Slutteligt eftervises, om det er rentabelt i et totaløkonomisk perspektiv at investere flere penge her og nu, frem for at vælge en billigere løsning.

I Be18 er der udført energitekniske beregninger på tre alternativer, i forskellige prisklasser, med tre forskellige afslutningsmuligheder - i alt ni afslutninger, for at eftervise, hvad der skal til for at bringe huset i renoveringsklasse 1 og 2. Be18 anvendes ligeledes til at eftervise, hvilken effekt temperaturen indendørs har på energibehovet. Alternativerne er derudover beregnet i LCC-byg, for at belyse de totaløkonomiske omkostninger over 50 år.

Beregningerne viser, at parcelhuset kan bringes i renoveringsklasse 1 og 2 på forskellige måder i forskellige prisklasser. Samtidigt viser beregningerne, at temperaturen indendørs har en væsentlig betydning for energibehovet, og derfor er den reelle energibesparelse ikke sammenlignelig med den standardiseret beregnede energibesparelse. De totaløkonomiske beregninger viser, at det generelt ikke kan betale sig i et totaløkonomisk perspektiv at investere flere penge her og nu, frem for at vælge et billigere alternativ.

Copyright © 2012. This report and/or appended material may not be partly or completely published or copied without prior written approval from the authors. Neither may the contents be used for commercial purposes without this written approval.

Energirenovering af parcelhuse fra 1960'erne og 1970'erne

I et totaløkonomisk perspektiv

Andreas Ladefoged

Master i bygningsfysik - Aalborg Universitet - 2022

Titelblad

Titel - Energirenovering af parcelhuse fra 1960'erne og 1970'erne
Undertitel - I et totaløkonomisk perspektiv
Udgave - 1. udgave
Udgivelsesår - 2022
Forfatter - Andreas Ladefoged, studienummer: 20206629
Uddannelse - Master i bygningsfysik
Semester - 4. forår 2022
Sideantal – 60,0 normalsider af 2400 anslag
Antal anslag - 143.973
Litteraturhenvisninger - APA
Udgiver - Aalborg Universitet, A.C. Meyers Vænge 15, 2450 København SV

Der gøres opmærksom på, at denne publikation er omfattet af ophavsretsloven.

Indhold

Figurliste 3
Tabelliste 3
Bilagsliste 5
1 Forord 7
2 Resumé 8
3 Indledning 9
3.1 Problemformulering 10
3.2 Afgrænsning af projektet 10
4 Lovmæssig og teoretisk baggrund for projektet 11
4.1 Bygningsreglementet 2018 11
4.2 Be18 13
4.2.1 Beregningsvejledning vedr. bygningers energibehov 14
4.2.2 DS-418, Beregning af bygningers varmetab 14
4.3 Pre- og reboundeffekter 14
4.4 Totaløkonomi og levetidsomkostninger 15
4.5 Bygningsfysiske problemstillinger 17
4.5.1 HEAT2 17
4.5.2 WUFI®-Pro 18
4.6 Øvrige programmer, standarder og værktøjer 18
5 Basisoplysninger og indtastning i Be18 19
5.1 Husets hoveddata og generelle forudsætninger 20
5.2 Husets klimaskærm og tekniske installationer 21
6 Resultater og analyse for eksisterende forhold 24
6.1 Analyse af resultater 26
7 Plan mod renoveringsklasse 1 og 2 27
7.1 Trin 1, udskiftning af vinduer og yderdøre 29
7.2 Trin 2, efterisolering af tagkonstruktion 33
7.3 Trin 3, hulmursisolering 37
7.4 Trin 4, ventilationsforhold 40
7.5 Trin 5, Varmefordelingsanlæg 46
7.6 Trin 6, Ind- og udvendig efterisolering samt solceller 50
7.6.1 Trin 6, Indvendig efterisolering 50
7.6.2 Trin 6, Udvendig efterisolering 53
7.6.3 Trin 6, Solceller 57
7.7 Opsummering på energioptimering 59
8 Pre- og reboundeffekter 60

9 Bygningsfysiske overvejelser ved energirenovering 62
9.1 Loftkonstruktion med eksisterende alu-kraft 62
9.2 Hulmursisolering 66
9.3 Skillevæg/ydervæg ved indvendig efterisolering 68
9.4 Andre forhold 70
10 Totaløkonomi 71
10.1 Renoveringsomkostninger 71
10.2 Totaløkonomiske beregninger i LCC-byg 72
10.3 Resultater af LCC-beregninger 74
10.3.1 Følsomhedsanalyse for energipris 76
10.3.2 Følsomhedsanalyse for kalkulationsrente 78
11 Diskussion 80
12 Konklusion 85
13 Perspektivering 86
14 Kilde- og litteraturfortegnelse 87

Figurliste

Figur 1. Varmebehov uden og med pre- og reboundeffekter 15
Figur 2. Luftfoto af husets beliggenhed 19
Figur 3. Facadeopstalter og snit. 19
Figur 4. Plantegning 20
Figur 5. Projektets organisering med alternativ A, B og C 27
Figur 6. Total varmebehov og -besparelse pr. år 61
Figur 7. Relativ fugtighed og temperatur, alternativ A før og efter efterisoleringen 64
Figur 8. Relativ fugtighed og temperatur med og uden ny dampspærre, med efterisolering 64
Figur 9. Relativ fugtighed og temperatur med forskellig ventilation i tagrummet 65
Figur 10. Temperaturforløb i ydervæg uden og med hulmursisolering. 67
Figur 11. Temperaturforløb i formuren uden og med hulmursisolering. 67
Figur 12. Montering af efterisoleringsplader *(Jackon brochure)* 68
Figur 13. Fugtforløb gennem ydervæg med indvendig efterisolering ved skillevæg 69
Figur 14. Generaliserede isopletsystemer af Sedlbauer (Havinga & Schellen, 2018) 69
Figur 15. Udklip fra beregning i LCC-byg, opdelt i grupper 73
Figur 16. Udklip fra beregning i LCC-byg, underopdeling i grupper 73
Figur 17. Opsummeret nutidsværdi (uden restværdi) for alternativer der kan bringe huset i renoveringsklasse 2 75
Figur 18. Opsummeret nutidsværdi (uden restværdi) for alternativer der kan bringe huset i renoveringsklasse 1 76
Figur 19. Opsummeret nutidsværdi (uden restværdi) med kalkulationsrenter på 1, 3 og 5% 79

Tabelliste

Tabel 1. Husets hoveddata 20
Tabel 2. Afvigelser fra tegningsmateriale 21
Tabel 3. Energi-rammer og behov for eksisterende forhold 24
Tabel 4. Dimensionerende transmissionstab 24
Tabel 5. Varmetilskud pr. år 25
Tabel 6. Sommerkomfort, mest solbelastede rum 25
Tabel 7. Dimensionerende transmissionstab fra ydervægge, tage og gulve i detaljer 26
Tabel 8. Indhold i alternativ A, B og C 28
Tabel 9. Ændringer i Be18 for vinduer og yderdøre i trin 1 30
Tabel 10. Energi-rammer og behov efter trin 1 30
Tabel 11. Dimensionerende transmissionstab for vinduer og yderdøre efter trin 1 31
Tabel 12. Varmetilskud pr. år efter trin 1 31
Tabel 13. Sommerkomfort, mest solbelastede rum, opholdsstuen efter trin 1 31
Tabel 14. Krav til opfyldelse jf. BR-18 §§ 280-281 efter trin 1 32
Tabel 15. Ændringer i Be18 for trin 2 34
Tabel 16. Energi-rammer og behov efter trin 2 34
Tabel 17. Dimensionerende transmissionstab for vinduer og yderdøre efter trin 2 35
Tabel 18. Sommerkomfort, mest solbelastede rum, opholdsstuen efter trin 2 35
Tabel 19. Krav til opfyldelse jf. BR-18 §§ 280-281 efter trin 2 36
Tabel 20. Ændringer i Be18 for trin 3 37
Tabel 21. Energi-rammer og behov efter trin 3 38

Tabel 22. Dimensionerende transmissionstab for vinduer og yderdøre efter trin 3 38
Tabel 23. Sommerkomfort, mest solbelastede rum, opholdsstuen efter trin 3 39
Tabel 24. Krav til opfyldelse jf. BR-18 §§ 280-281 efter trin 3 39
Tabel 25. Indhold i trin 4 for alternativ A, B og C 40
Tabel 26. Ændringer i Be18 for trin 4 42
Tabel 27. Energi-rammer og behov efter trin 4 43
Tabel 28. Dimensionerende transmissionstab for vinduer og yderdøre efter trin 4 44
Tabel 29. Sommerkomfort, mest solbelastede rum, opholdsstuen efter trin 4 44
Tabel 30. Krav til opfyldelse jf. BR-18 §§ 280-281 efter trin 4 45
Tabel 31. Ændringer i Be18 for tekniske installationer i trin 5 47
Tabel 32. Energi-rammer og behov efter trin 5 47
Tabel 33. Varmetilskud pr. år efter trin 5 48
Tabel 34. Krav til opfyldelse jf. BR-18 §§ 280-281 efter trin 5 49
Tabel 35. Ændringer i Be18 for i trin 6 med indvendig efterisolering 51
Tabel 36. Energi-rammer og behov efter trin 6 med indvendig efterisolering 51
Tabel 37. Dimensionerende transmissionstab for efter trin 6 med indvendig efterisolering 52
Tabel 38. Sommerkomfort, mest solbelastede rum, efter trin 6 med indvendig efterisolering 52
Tabel 39. Krav til opfyldelse jf. BR-18 §§ 280-281 efter trin 6 med indvendig efterisolering 53
Tabel 40. Ændringer i Be18 for i trin 6 med udvendig efterisolering 54
Tabel 41. Energi-rammer og behov efter trin 6 med udvendig efterisolering 55
Tabel 42. Dimensionerende transmissionstab for efter trin 6 med udvendig efterisolering 55
Tabel 43. Sommerkomfort, mest solbelastede rum, efter trin 6 med indvendig efterisolering 56
Tabel 44. Krav til opfyldelse jf. BR-18 §§ 280-281 efter trin 6 med indvendig efterisolering 56
Tabel 45. Indtastninger i Be18 for trin 6 med solceller 57
Tabel 46. Energi-rammer og behov efter trin 6 med solceller 58
Tabel 47. Krav til opfyldelse jf. BR-18 §§ 280-281 efter trin 6 med solceller 58
Tabel 48. Opsummering for overholdelse af energirammer 59
Tabel 49. Varme- og elbehov til bygningsdrift med og uden pre- og reboundeffekt 60
Tabel 50. Omkostninger for at bringe huset i renoveringsklasse 1 og 2 71
Tabel 51. Totaløkonomisk beregning af renoveringstrin der kan bringe huset i renoveringsklasse 2 74
Tabel 52. Totaløkonomisk beregning af renoveringstrin der kan bringe huset i renoveringsklasse 1 74
Tabel 53. Fjernvarmepriser pr. 3. august 2021 77
Tabel 54. Resultater af følsomhedsanalyse vedr. fjernvarmepriser 77
Tabel 55. Resultater af følsomhedsanalyse vedr. kalkulationsrente 78

Bilagsliste

Nummer	Indhold	Filtype
Bilag 1	Originale tegninger	pdf
Bilag 2	Inddata til Be18_eksisterende forhold	pdf
Bilag 3	Be-18_Kastanievej 43 - Eksisterende forhold	bexml
Bilag 4	Energiteknisk dok- ekst forhold	pdf
Bilag 5	Energiteknisk dok- trin 1	pdf
Bilag 5-A1	Be18_A- trin 1	bexml
Bilag 5-B1	Be18_B- trin 1	bexml
Bilag 5-C1	Be18_C- trin 1	bexml
Bilag 6	Energiteknisk dok- trin 2	pdf
Bilag 6-A2	Be18_A- trin 2	bexml
Bilag 6-B2	Be18_B- trin 2	bexml
Bilag 6-C2	Be18_C- trin 2	bexml
Bilag 7	Energiteknisk dok- trin 3	pdf
Bilag 7-A3	Be18_A- trin 3	bexml
Bilag 7-B3	Be18_B- trin 3	bexml
Bilag 7-C3	Be18_C- trin 3	bexml
Bilag 8	Energiteknisk dok- trin 4	pdf
Bilag 8-A4	Be18_A- trin 4	bexml
Bilag 8-B4	Be18_B- trin 4	bexml
Bilag 8-C4	Be18_C- trin 4	bexml
Bilag 9	Energiteknisk dok- trin 5	pdf
Bilag 9-A5	Be18_A- trin 5	bexml
Bilag 9-B5	Be18_B- trin 5	bexml
Bilag 9-C5	Be18_C- trin 5	bexml
Bilag 10	Energiteknisk dok- trin 6	pdf
Bilag 10-A6-I	Be18_A- trin 6-I	bexml
Bilag 10-B6-I	Be18_B- trin 6-I	bexml
Bilag 10-C6-I	Be18_C- trin 6-I	bexml
Bilag 10-A6-U	Be18_A- trin 6-U	bexml
Bilag 10-B6-U	Be18_B- trin 6-U	bexml
Bilag 10-C6-U	Be18_C- trin 6-U	bexml
Bilag 10-A6-S	Be18_A- trin 6-S	bexml
Bilag 10-B6-S	Be18_B- trin 6-S	bexml
Bilag 10-C6-S	Be18_C- trin 6-S	bexml
Bilag 11	Be18_Kastanievej 43 - Ekst forhold - pre-19	bexml
Bilag 12-C6-U	Be18_C- trin 6-U - Re-21	bexml

Fortsættes…

Nummer	Indhold	Filtype
Bilag 13	WUFI-simuleringer, tagrum	pdf
Bilag 14	HEAT2- Hulmursisolering	pdf
Bilag 15	Priskalkulation i sigma estimates	pdf
Bilag 16	LCC_huskøb+RK-2	lccxml
Bilag 17	LCC_huskøb+RK-1	lccxml
Bilag 18	LCC-Rapport RK-2	pdf
Bilag 19	LCC-Rapport RK-1	pdf
Bilag 20	LCC_huskøb+RK-1 Q1	lccxml
Bilag 21	LCC_huskøb+RK-1 Q2	lccxml
Bilag 22	LCC_huskøb+RK-1 DF	lccxml
Bilag 23	LCC_huskøb+RK-1 1%	lccxml
Bilag 24	LCC_huskøb+RK-1 5%	lccxml
Bilag 25	LCC_ C- trin 6-S-hussalg_25 år	lccxml
Bilag 26	Be18_C- trin 6-S+nyt hus	bexml
Bilag 27	LCC_ C- trin 6-S+nyt hus	lccxml

1 Forord

Nærværende rapport er udarbejdet som en del af afslutningen på efteruddannelsen, Master i Bygningsfysik på Aalborg Universitet, København. Rapporten udgør 15 ECTS-point og er udarbejdet fra primo februar til primo juni 2022.

Emnet for denne rapport er selvvalgt ud fra egen undren og interesse. Rapportens emne er relevant for den almene boligejer samt for tekniske rådgivere inden for byggeri. Emnet er ligeledes vigtigt i en samfundsmæssig kontekst, i forhold til at Danmark kan opnå at være et klimaneutralt samfund senest i 2050.

For at opnå en god forståelse for rapportens enkelte afsnit og begreber, kan det være nødvendigt at have en byggeteknisk forståelse, specielt inden for det energitekniske område. Rapporten kan læses selvstændigt, men dens indhold understøttes af et antal bilag.

I dette forord benyttes muligheden for at takke Kim B. Wittchen og Kim Haugbølle for vejledning og støtte under udarbejdelse af denne rapport.

.

Andreas Ladefoged

Esbjerg, juni 2022

2 Resumé

Nærværende rapport har til formål at beskrive, hvilke energirenoveringstiltag, der kan anvendes til at bringe et parcelhus fra 1971 i renoveringsklasse 1 og 2 jf. bygningsreglementet §§ 280-281, samtidigt med at de kan udføres bygningsfysisk forsvarligt. Derudover er formålet at belyse, hvilken effekt det har på energibehovet at anvende andre temperaturer indendørs end den standardiserede temperatur. Slutteligt eftervises, om det er rentabelt i et totaløkonomisk perspektiv at investere flere penge her og nu, frem for at vælge en billigere løsning.

I Be18 er der udført energitekniske beregninger på tre alternativer, i forskellige prisklasser, med tre forskellige afslutningsmuligheder - i alt ni afslutninger, for at eftervise, hvad der skal til for at bringe huset i renoveringsklasse 1 og 2. Be18 anvendes ligeledes til at eftervise, hvilken effekt temperaturen indendørs har på energibehovet. Alternativerne er derudover beregnet i LCC-byg, for at belyse de totaløkonomiske omkostninger over 50 år.

Beregningerne viser, at parcelhuset kan bringes i renoveringsklasse 1 og 2 på forskellige måder i forskellige prisklasser. Samtidigt viser beregningerne, at temperaturen indendørs har en væsentlig betydning for energibehovet, og derfor er den reelle energibesparelse ikke sammenlignelig med den standardiseret beregnede energibesparelse. De totaløkonomiske beregninger viser, at det generelt ikke kan betale sig i et totaløkonomisk perspektiv at investere flere penge her og nu, frem for at vælge et billigere alternativ.

Summary in english

The purpose of this report is to describe which energy renovation measures can be used to bring a single-family house from 1971 in renovation class 1 and 2, cf. the building regulations §§ 280-281, at the same time as they can be carried out in a building-physically healthy. In addition, the purpose is to shed light on the effect on energy needs of using indoor temperatures other than the standardized temperature. Finally, it is proven whether it pays in a total economic perspective to invest more money here and now rather than choosing a cheaper solution.

In Be18, energy technical calculations have been performed on three alternatives, in different price ranges with three different finishing options - a total of nine finishes, so that according to what it takes to bring the house into renovation class 1 and 2. Be18 is also used to prove the effect temperature indoors has on the energy needs. The alternatives are also calculated in LCC barley, to prove the total economic costs over 50 years.

The calculations show that the single-family house can be brought into renovation class 1 and 2 in different ways in different price ranges. At the same time, the calculations show that the temperature indoors has a significant effect on the energy demand, and therefore the real energy savings are not comparable with the standardized calculated energy savings. The total economic calculations show that it is generally not worthwhile to invest more money here and now, rather than choosing a cheaper alternative.

3 Indledning

Folketinget vedtog i 2020 den danske klimalov, hvis formål er, *"at Danmark skal reducere udledningen af drivhusgasser i 2030 med 70 pct. i forhold til niveauet i 1990, og at Danmark opnår at være et klimaneutralt samfund senest i 2050. Med klimaloven bliver reduktionsmålene således juridisk bindende"* (Energistyrelsen, 2022). Reduktionen af udledning af drivhusgasser er en nødvendighed, for at bremse den negative udvikling for klimaet, hvilket senest er beskrevet i IPCC's sjette hovedrapport, hvor det bl.a. er beskrevet at: *"En global opvarmning, som nærmer sig 1,5°C i den nære fremtid, vil forårsage uundgåelige stigninger i adskillige klimarelaterede farer og betyde adskillige risici for økosystemer og mennesker"* (Miljøministeriet / Miljøstyrelsen, 2022). I den danske klimalov er der bl.a. beskrevet øget mål for energieffektivisering, hvilket medfører, at den nationale energispareforpligtelse hæves og der stilles krav til renovering af alle offentlige bygninger (Regeringen, 2021).

Ud over de offentlige bygninger, er der et stort uudnyttet potentiale i energibesparelse ved energirenovering af private boliger. I Danmark stammer ca. 40% af det samlede energiforbrug fra bygninger. Af den samlede bygningsmasse udgør bygninger til helårsbeboelse 40% (Realdania, 2017). Energirenovering af den private boligmasse er derfor et vigtigt element, for at Danmark kan opnå målsætningen for 2050.

Parcelhuse udgør ca. 43% af det totale bolig- og erhvervsareal registreret i BBR 2010 (inkl. fredede arealer), hvoraf de ca. 39% er opført i 1961-1978 (Kragh & Wittchen, 2010). Af de parcelhuse, der er opført i perioden 1961-1978 og i dag er energimærket, har ca. 78% energimærke D eller ringere (Energistyrelsen, 2022). Ud over en reduktion i udledning af drivhusgasser, har energirenoveringer ligeledes et økonomisk perspektiv for den enkelte bygningsejer f.eks. lavere driftsomkostninger. Derudover giver et bedre energimærke også en højere salgspris, f.eks. fra energimærke D til C på ca. 790 kr. pr. m^2 (Hansen, Jensen, & Kragh, 2013).

I bygningsreglementet er der forskellige måder, de energitekniske bestemmelser kan eftervises overholdt. I 2015 blev renoveringsklasse 1 og 2 indført, som en alternativ måde at dokumentere energitekniske krav i forbindelse med ombygning og renovering.

Nærværende rapport har til formål at beskrive hvilke energirenoveringstiltag, der er nødvendige for at opnå renoveringsklasse 1 og 2 i Bygningsreglementet 2018 for et parcelhus fra 1971. Det beregningsmæssige energibesparelsespotentiale for et parcelhus har mange usikkerheder, derfor beregnes effekten med andre temperaturer indendørs før og efter en energirenovering, end de standardiserede indendørstemperaturer. Det har fra projektets start været en målsætning, at renoveringstiltagene, der regnes på, er realistiske, og kan udføres i virkeligheden.

Derudover sættes energirenoveringen i økonomisk perspektiv ved beregning og analyse af totaløkonomi og levetidsomkostninger. Da en energirenovering er en langsigtet investering med mange økonomiske usikkerheder, udføres der følsomhedsanalyser på to centrale parametre: Energipris og kalkulationsrente, for at vise hvordan disse kan påvirke det totaløkonomiske regnskab.

En energirenovering medfører ændringer i klimatiske forhold i en bygning. Disse ændringer kan have negativ eller positiv påvirkning af bygningsdele. For at eftervise, at de nødvendige energirenoveringstiltag er bygningsfysisk forsvarlige, dokumenteres dette ved et mindre antal kritiske steder i konstruktionerne med beregning og/eller simulering.

Resultaterne sættes i sidste ende i relation til det at opføre et nyt hus, i forhold til f.eks. forhold som komfort, indeklima, energiforbrug og vedligehold.

3.1 Problemformulering

Da Danmark har vedtaget en klimalov, og derved forpligtiget sig på at reducere det samlede energiforbrug, skal alle bidrage. Danskernes mest udbredte og mest populære boligform er parcelhuset, som i alt udgør cirka 1,1 millioner, heraf er halvdelen opført i 1960'erne og 1970'erne. Parcelhusene fra disse årtier er blandt andet opført med lavere isoleringsmængder end nutidens standarder, derfor er der et stort energibesparelses-potentiale i disse parcelhuse.

Hvilket potentiale dette har, og hvad det totaløkonomiske perspektiv i energirenoveringer er, skal besvares med nedenstående spørgsmål:

- Hvilke energirenoveringstiltag kan bringe et parcelhus fra 1971 i renoveringsklasse 1 og 2, som samtidigt kan udføres bygningsfysisk forsvarligt?

- Hvilken effekt på energibehovet til bygningsdrift har andre temperaturer indendørs, som udgør prebound og reboundeffekter?

- Er det økonomisk rentabelt at investere flere penge her og nu i en energirenovering, frem for at vælge en billigere løsning, set i et totaløkonomisk perspektiv, og hvilken rolle spiller energipris og kalkulationsrenten på resultaterne?

3.2 Afgrænsning af projektet

Projektet, der ligger til grund for nærværende rapport, afgrænses ved, at der kun beregnes og analyseres på ét hus. Afgrænsningen gøres for, at der kan beregnes og analyseres mere grundigt i projektperioden, end hvis beregninger og analyser skulle dække et større antal huse.

I forhold til bygningsfysiske udfordringer beregnes og simuleres kun et mindre antal kritiske steder i konstruktionerne, da projektets hovedformål er energibesparelsespotentiale samt totaløkonomi.

I forbindelse med beregning af parcelhusets energibehov, anvendes linjetabskoefficienter fra tabelopslag. Dette er gjort, da det er vurderet at beregnede værdier ikke vil influere væsentligt på de endelige resultater. Derudover ville beregninger af linjetabskoefficienter tage en del tid fra andre mere væsentlige dele af projektet.

Ændringer i terrændækkets opbygning tages ikke i betragtning, af statiske årsager, der beskrives nærmere i afsnit 7.

4 Lovmæssig og teoretisk baggrund for projektet

Projektets beregninger og analyser tager udgangspunkt i en række lovgivningsmæssige rammer, teoretiske normer og standarder, som beskrives i dette afsnit. Derudover beskrives en række begreber og programmer, som er anvendt i forbindelse med udarbejdelsen af projektet.

4.1 Bygningsreglementet 2018

I bygningsreglementet 2018, aktuelt efter 31.12.2021, herefter kaldt BR-18, er der flere bestemmelser på det energitekniske område vedr. ombygninger og andre forandringer.

Jf. BR-18 § 274 skal der ved ombygninger gennemføres energibesparende tiltag, i det omfang de er rentable og kan udføres fugtmæssigt forsvarligt. Dette krav kan overholdes ved, at den berørte bygningsdel føres op til komponentkrav, der er beskrevet i § 279 tabel 3. Denne bestemmelse er anvendelige ved enkelttiltag, eksempelvis ved en udskiftning af tagdækningen.

Alternativt kan energikravene overholdes ved at følge renoveringsklasserne, der er beskrevet i BR-18 §§ 280-282. Disse renoveringsklasser fastsætter en energiramme for drift af eksisterende bygninger.

Ved udskiftninger af hele bygningsdele samt installationer skal bestemmelserne i BR-18 § 279 altid overholdes uanset rentabilitet.

Kirker og bygninger, som er en del af et fredet fortidsminde, er fritaget for at følge bestemmelserne i BR-18 §§ 274-282. Derudover kan fredede og bevaringsværdige bygninger ligeledes være undtaget for at overholde disse bestemmelser. Dette er nærmere beskrevet i § 278.

Renoveringsklasser for eksisterende bygninger

Ved anvendelse af renoveringsklasse 1 eller 2 har bygningsejeren en frivillig mulighed for at overholde de energitekniske bestemmelser i BR-18 vedr. ombygninger og andre forandringer. I dette tilfælde er det ikke nødvendigt at overholde de enkelte komponentkrav i § 279 tabel 3. Derimod er der større valgfrihed i forhold til, hvordan en samlet renovering skal udføres, og bygningens energibehov bringes ned på et fremtidssikret niveau. Renoveringsklasserne er derfor en mulighed for en helhedsorienteret tilgang til renoveringen. Det skal dog bemærkes, at de enkelte komponentkrav i § 279 tabel 3 skal overholdes ved en total udskiftning af en bygningsdel.

Ved anvendelse af renoveringsklasserne er der fire punkter, der skal opfyldes. Disse er beskrevet i § 280 og lyder som følger:

1. *"Behovet for tilført energi skal mindst reduceres med 30,0 kWh/m² pr. år.*
2. *Eftervisningen skal ske i henhold til SBi-anvisning 213 Bygningers energibehov.*
3. *Der skal være en andel af vedvarende energi i den samlede energiforsyning til bygninger.*
4. *Ved anvendelse af renoveringsklasse 1 skal kravene til indeklimaet i §§ 382-384, § 386 og §§ 443-449 overholdes".* (Bolig- og Planstyrelsen, 2022)

Det er et krav, at energibehovet reduceres. Hvis en reduktion på 30 kWh/m² pr. år ikke kan opnås, kan hverken renoveringsklasse 1 eller 2 opnås. BR-18 nævner dog ikke noget om, hvad udgangspunktet er – det kan således være fra som bygningen oprindeligt var opført eller som bygningen stod umiddelbart før renoveringen startede. Eftervisningen, som skal ske i henhold til SBi-anvisning 213 Bygningers energibehov, kan udføres med programmet Be18, hvilket beskrives i afsnit 4.2. Iht. BR-18 § 298 opfylder bygninger forsynet med fjernvarme kravet i pkt. 3 i § 280.

Kravene til indeklima, som er nødvendige for at renoveringsklasse 1 kan overholdes, omhandler overordnet:

§§ 382-384: Elektrisk belysning i arbejdsrum mv. og fælles adgangsveje. Det bør bemærkes, at elektrisk belysning ikke indgår i energirammeberegninger for boliger jf. SBi-anvisning 213 kap. 8.

§ 386: Bestemmelser generelt for termisk indeklima, hvilket betyder for boliger, at bestemmelsen normalt kan anses for overholdt, når der maksimalt er 100 timer pr. år af brugstiden, hvor rumtemperatur overskrider 27 °C og 25 timer pr. år, hvor rumtemperaturen overskrider 28 °C. Dette kan eftervises med Be18.

§§ 443-449: Omhandler ventilation i bygninger. For boliger gælder det overordnet i §§ 443 - 446, at der skal være udelufttilførsel på mindst 0,30 l/s pr. m² opvarmet etageareal, der kan tilvejebringes enten ved naturlig eller mekanisk ventilation, eller ved en kombination. Det er samtidigt tilladt at reducere udelufttilførslen til 0,15 l/s pr. m² i en længere periode over døgnet, hvis boligen ikke er i anvendelse. Derudover er der specifikke krav til emhætter i køkkener. Ved mekanisk ventilation er der specifikke krav til mængden af udsugning i bad, toilet, bryggers og køkken. §§ 447-449 omhandler daginstitutioner, undervisningsrum, andre bygninger og rum.

For at opfylde en renoveringsklasse, er det tale om en samlet energiramme, den enkelte bygning skal overholde. Disse er beskrevet i BR-18 §§ 281-282. Følgende gælder:

§ 281: *"Boliger, kollegier, hoteller og lignende kan klassificeres som:*

1) Renoveringsklasse 2, når det samlede behov for tilført energi til opvarmning, ventilation, køling og varmt brugsvand pr. m² opvarmet etageareal ikke overstiger 70,0 kWh/m² pr. år tillagt 2.200 kWh pr. år divideret med det opvarmede etageareal.

2) Renoveringsklasse 1, når det samlede behov for tilført energi til opvarmning, ventilation, køling og varmt brugsvand pr. m² opvarmet etageareal ikke overstiger 52,5 kWh/m² pr. år tillagt 1.650 kWh pr. år divideret med det opvarmede etageareal" (Bolig- og Planstyrelsen, 2022).

For andre bygninger end boliger, som kontorer, skoler, institutioner og andre bygninger, der ikke er omfattet af § 281, gælder andre energirammer. Disse er beskrevet i BR-18 § 282.

Energirammen omfatter leveret energi til bygningen til opvarmning, ventilation, varmt vand, køling og eventuel belysning, multipliceret med den relevante energifaktor for hver energibærer. Energifaktorerne udtrykker primærenergiforbruget ved forskellige forsyningstyper. Disse er baseret på Energistyrelsens energistatistik og basisfremskrivning. Primærenergi udtrykker hvor meget energi, der benyttes til at producere energibærerne.

"Den energimæssige ydeevne af bygninger beregnet med energifaktorer afspejler derfor hvor stort et primærenergiforbrug, der benyttes til at producere den slutenergi, som driver bygningerne" (Bolig- og Planstyrelsen, 2022).

I BR-18 § 252 er følgende beskrevet:

"I bygninger skal der ved beregning af det samlede tilførte energibehov ske en vægtning af de enkelte forsyningsformer. Der anvendes følgende faktorer:

1. *1,9 for el.*
2. *0,85 for fjernvarme.*
3. *For andre former for varme benyttes en faktor på 1,0 og den relevante nyttevirkning".* (Bolig- og Planstyrelsen, 2022)

4.2 Be18

Beregningsprogrammet Be18, er et program som kan bruges til at dokumentere, om en bygning opfylder energibestemmelserne i bygningsreglementet. Programmet er udviklet på BUILD, Institut for byggeri, by og miljø på Aalborg universitet.

Ved anvendelse af programmet kan flere resultater uddrages, bl.a. følgende:

- Bygningens samlede dimensionerende transmissionstab samt transmissionstabsramme
- Bygningens samlede dimensionerende transmissionstab inkl. ventilationstab med og uden varmegenvinding
- Boligens sommerkomfort for det mest solbelastede rum iht. BR-18 §386
- Bygningens samlede energiramme samt bygningens samlede energibehov
- Bidrag til energibehovet, herunder varme, el til bygningsdrift samt overtemperatur i rum
- Udvalgte el-behov
- Netto behov fra rumopvarmning, varmt brugsvand og køling
- Varmetab fra installationer
- Ydelser fra særlige kilder, herunder solvarme, varmepumpe, solceller og vindmøller
- Månedsvis detaljeret opgørelse over bygningens varmebalance, der er et produkt af varmetab og varmetilskud i bygningen

Til beregninger i dette projekt er Be18 version 10.19.7.22 anvendt.

4.2.1 Beregningsvejledning vedr. bygningers energibehov

SBi-anvisning 213 er en beregningsvejledning, som bruges når bygningers energibehov skal dokumenteres. Dette kan ske med Be18. Der beskrives i anvisningen kapitel for kapitel, hvordan de enkelte felter i Be18 skal udfyldes (Aggerholm, 2018).

Der refereres flere steder i anvisningen til DS 418, Beregning af bygningers varmetab (Dansk standard, 2020) I forhold til bl.a.:

- Transmissionsarealer [m^2]
- Transmissionskoefficienter (U-værdi) [W/m^2K]
- Linjetabslængder [m]
- Linjetabskoefficienter (ψ) [W/mK]
- Dimensionerende inde- og udetemperaturer

I dette projekt er SBi-anvisning 213, 6. udgave anvendt.

4.2.2 DS-418, Beregning af bygningers varmetab

Standarden beskriver hvordan bygningers varmetab skal beregnes, herunder:

- Dimensionerende temperaturer
- Beregning af transmissionstab
- Beregning af ventilationstab
- Beregning af det samlede varmetab
- Beregning af transmissionskoefficient
- Materialers isolans og varmeledningsevne

Områder i projektet der skal udføres iht. DS 418 følger standardens beskrivelser og metoder. I dette projekt er DS 418:2011 + Till.1:2020 anvendt.

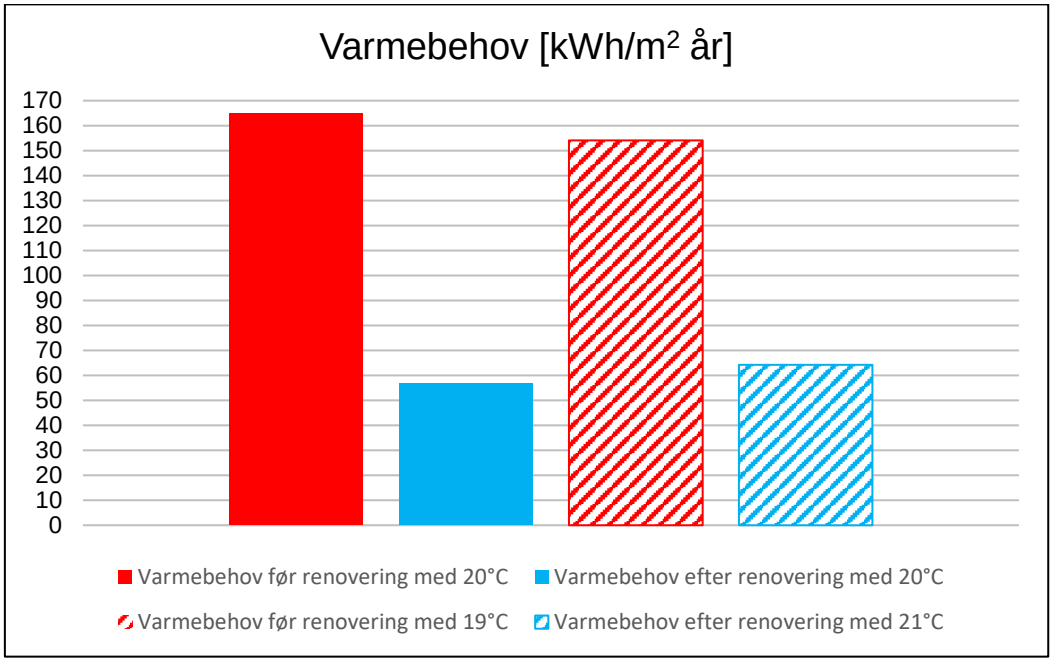
4.3 Pre- og reboundeffekter

Gennemsnitstemperaturen i en bygning før og efter en renovering, kan have betydning for, om energibesparelsen bliver som beregnet. Ved beregning af energibehov i Be18 anvendes et fastsat setpunkt for rumopvarmning på 20 °C. Denne temperatur er en månedlig gennemsnitstemperatur i alle rum inden for det opvarmede etageareal.

Prebound betyder, at brugerne af en bygning bruger mindre energi end beregnet inden en renovering, fordi de ikke varmer bygning så meget op for at spare på varmen. Eks. kan bygningen være opvarmet til en gennemsnitligt lavere temperatur end 20 °C som anvendes i beregningerne, og dermed beregnes et højere energibehov end der anvendes i virkeligheden.

Rebound betyder, at brugeren af en bygning efter en renovering bruger mere energi, end der er regnet med. Efter en renovering vil udgifter til opvarmning være reduceret, og brugerne er muligvis ikke så opmærksomme på at holde indetemperaturen lav, men skruer op for varmen for at have en bedre komfort i bygningen. Når der i dette tilfælde er beregnet med en indetemperatur på 20 °C efter renoveringen, vil energibesparelsen ikke være så stor som beregnet, fordi der anvendes mere energi til opvarmning. En forøgelse af energibehovet kan også skyldes, at brugerne lufter ud gennem vinduer, selvom beregningerne udelukkende et baseret på mekanisk ventilation. (Mortensen & et al., 2018)

Figuren nedenfor viser med en mindre difference mellem varmebehovet med 19 og 20 grader, hvordan pre- og reboundeffekter kan påvirke energibesparelsen til at være mindre end beregnet.



Figur 1. Varmebehov uden og med pre- og reboundeffekter

4.4 Totaløkonomi og levetidsomkostninger

Enhver investering kan besluttes udelukkende ud fra investeringsprisen her og nu. Men hvad en investering koster over en lang periode, når reparation, fornyelse, drifts-omkostninger osv. medregnes, kan en totaløkonomisk beregning svare på. Det kan vise sig, at en dyrere her og nu investering er billigere i det lange løb. Eksempelvis kan det være billigere over en 50-årig periode at montere fast undertag frem for en billigere banevare, som har en kortere levetid, og dermed skal skiftes en eller to gange over en 50- årig periode.

Totaløkonomi (Life Cycle Costing (LCC)) er en tilgang til nybyggeri og renovering, som udvider det økonomiske perspektiv, fra udelukkende at fokusere på omkostninger til anskaffelse, til også at inkludere de omkostninger, der opstår under driften og brugen af en bygning, herunder vedligehold, udskiftning, energi til drift mv.

En totaløkonomisk analyse kan f.eks. bruges til at sammenligne forskellige renoveringsforslag. Det er dog vigtigt, at de enkelte alternativer har et fælles referencegrundlag som f.eks. prisudvikling for energi og kalkulationsrente. Med disse beregninger kan bygningsejeren træffe et valg ud fra analyser med et tidsperspektiv. Dog må der huskes på, at flere parametre kan lægge til grundlag for en endelig beslutning, eks. indeklima, komfort, byggetekniske løsninger, miljø og arkitektur.

For at man kan sammenligne de enkelte alternativer, skal alle omkostningerne over tid regnes sammen til et fælles tidspunkt, dette kaldes tilbagediskontering. *"Summen af nutidsværdien af alle de fremtidige omkostninger er et udtryk for, hvor mange penge der skal sættes til side i dag for at kunne betale alle omkostninger over tid, givet at det*

tilsidesatte beløb forrentes med kalkulationsrenten" (Haugbølle, 2016). Med en samlet nutidsværdi for de enkelte alternativer, kan de nu sammenlignes. Alternativet med den mindste nutidsværdi, er det alternativ der er billigst over kalkulationsperioden.

Nutidsværdien kan omregnes til en gennemsnitlig årlig omkostning, som svarer til en fast årlig husleje, hvor alle de medregnede omkostninger er inkluderet.

Vigtige begreber:

"Nutidsværdien: *Defineres som summen af de tilbagediskonterede fremtidige pengestrømme. Nutidsværdien er et udtryk for hvor mange penge, der skal sættes til side i dag for at kunne afholde alle fremtidige omkostninger i beregningsperioden med den valgte kalkulationsrente.*

Årsomkostningen: *Defineres som en annuitet af nutidsværdien. Årsomkostningen udtrykker dermed hvor mange penge, der gennemsnitligt skal afsættes hvert år i beregningsperioden.*

Kalkulationsrenten: *Betegnelsen for den renteprocent eller omregningsfaktor, som anvendes ved beregningen af nutidsværdien. Jo højere rente, jo lavere er nutidsværdien i dag af de omkostninger og indtægter, som ligger ude i fremtiden".* (Haugbølle, 2016)

Til totaløkonomiske kalkulationer og analyser i dette projekt et programmet LCCbyg version 3.4.8 anvendt. Det er udviklet af Institut for Byggeri, By og Miljø (BUILD)/Aalborg Universitet.

4.5 Bygningsfysiske problemstillinger

Da ændringer i bygningens klimaskærm eller indeklimaet i forbindelse med renovering kan give bygningsskader og helbredsmæssige gener, er det vigtigt hvilke løsninger der vælges og hvordan renoveringen gribes an.

Ved efterisolering ændres forudsætningerne for varme og fugttransport gennem konstruktionerne. Dette kan medføre ophobning af fugt, som kan føre til skader i den enkelte konstruktion, f.eks. frostsprængninger, råd, svamp og skimmelvækst. Det er samtidig vigtigt, at utilsigtede utætheder i klimaskærmen undgås, da de kan føre til øget varmetab, nedsat komfort og trækgener, samt at varm og fugtig luft kan trække ud i konstruktionen med øget luftfugtighed til følge, som kan føre til ovenstående bygningsskader. (Møller, Eva B., 2012)

Da gasarten radon er sundhedsskadelig, og forekommende i luften, er det ved renovering af en bygning oplagt at undersøge, om der er et for højt niveau af radon i indeluften og hvis det er nødvendigt, så gennemføre renoveringstiltag, der kan reducere indholdet af radon i indeluften. (Rasmussen T. V., 2016)

Forandringer i en bygningsdel kan have indflydelse på andre bygningsdele, komponenter samt bygningens funktion. Derfor er det nødvendigt at analysere bygningens konstruktioner og mulige konsekvenser ved en renovering.

For at eftervise, at de byggetekniske løsninger i dette projekt er bygningsfysisk forsvarlige, analyseres et mindre antal kritiske steder ved beregning og/eller simulering. Til dette anvendes nedenstående programmer.

4.5.1 HEAT2

Programmet HEAT2 kan anvendes til beregning af flerdimensionel transient og steady-state varmetransmission. Programmet beregner varmestrømme gennem en konstruktion ved en iterativ proces ved hjælp af en netinndeling af konstruktionen. HEAT2 håndterer beregninger for temperaturafhængige materialeegenskaber (varmeledningsevne og varmekapacitet) og faseændringer. Det kan også håndtere et variabelt snelag samt kuldeperioder i beregningerne. (Blocon A, 2022)

Med HEAT2 kan følgende beregnes og analyseres:

- Generelle varmeledningsproblemer
- Kuldebroer
- Beregning af U-værdier for bygningskonstruktionsdele
- Estimering af overfladetemperaturer (kondensrisici)
- Beregning af varmetab til jorden fra et hus
- Optimering af isoleringsarmatur
- Analyse af gulvvarmeanlæg
- Analyse af vinduesrammer

Til beregninger og analyser i dette projekt, der er udført med HEAT2, er version 10.13 anvendt.

4.5.2 WUFI®-Pro

Programmet WUFI®Pro kan anvendes til at simulere fugtforhold gennem en bygnings klimaskærm ved endimensionelle hygrotermiske beregninger på bygningsdeles tværsnit, idet der kan tages højde for (hvor det er relevant) indbygget fugt, slagregn, solstråling, langbølget stråling, kapillærtransport og sommerkondens. (Fraunhofer IBP, 2022)

I programmet anvendes in-stationære forhold som varierer over tid. Disse forhold kan f.eks. være inde- og udetemperaturer, inde- og udeklimatiske forhold. Af denne årsag kan simuleringerne vise resultater som opfugtning og udtørring samt mulighederne for skimmelvækst.

Til simuleringer i dette projekt, der er udført med WUFI®Pro, er version 6.5 anvendt.

4.6 Øvrige programmer, standarder og værktøjer

Til at beregne anlægsomkostningerne, der ligger til grund for de totaløkonomiske analyser i LCCbyg, er Sigma Entreprise anvendt med prisudtræk fra Molio Prisdata, tidligere V&S prisdata.

Sigma Entreprise er et kalkulationsprogram, hvor de enkelte komponenter og bygningsdele sammenregnes ud fra antal og stykpris. Programmet giver et klart økonomisk overblik (EG, 2022).

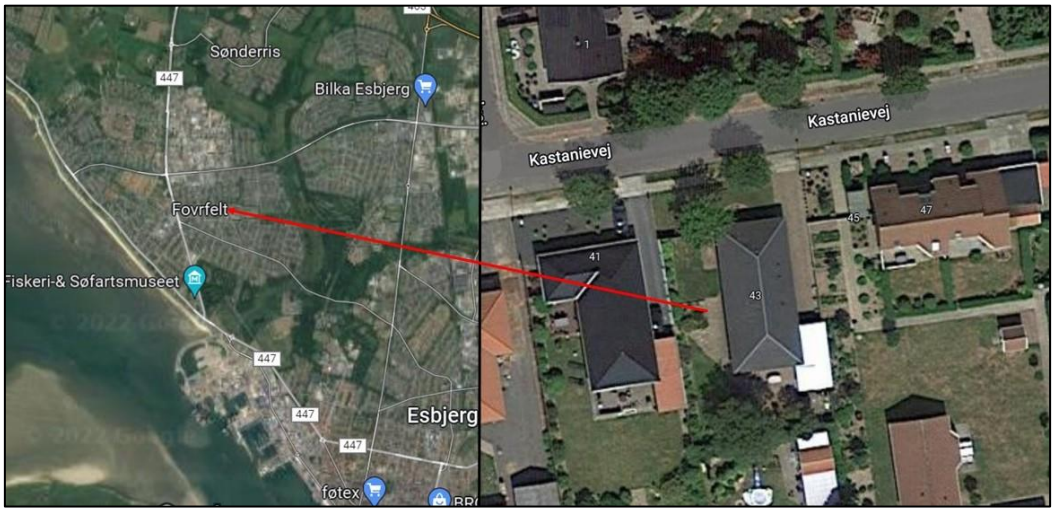
I dette projekt er kalkulationer i Sigma Entreprise udført med version 7.1.3.11920

Molio Prisdata er en række prisbøger, som er udviklet igennem næsten 50 år, og er et anerkendt værktøj inden for bygge- og anlægsbranchen (Molio, 2022).

For prisdata i dette projekt er følgende prisdatabaser anvendt: Renovering – Bygningsdele 2022 samt Renovering – Fagdele 2022.

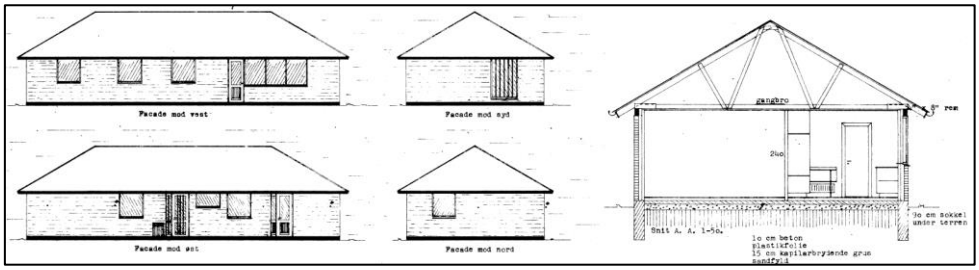
5 Basisoplysninger og indtastning i Be18

Parcelhuset, i det følgende benævnt som huset, som projektets beregninger og analyser tager afsæt i, er et typisk enfamiliehus fra 1971. Det er opført i konstruktioner og materialer, der var typiske på opførselstidspunktet. Huset er beliggende i Esbjerg på Kastanievej i bydelen Fovrfeld, ca. 1,1 km i fugleflugt fra havet. For at energibehovet og energirammerne for renoveringsklasse 1 og 2 kan beregnes i Be18, er det eksisterende tegningsmateriale gransket, derudover er huset inspiceret og opmålt. Beregningerne danner herefter grundlag for en plan til at bringe huset i renoveringsklasse 1 og 2.



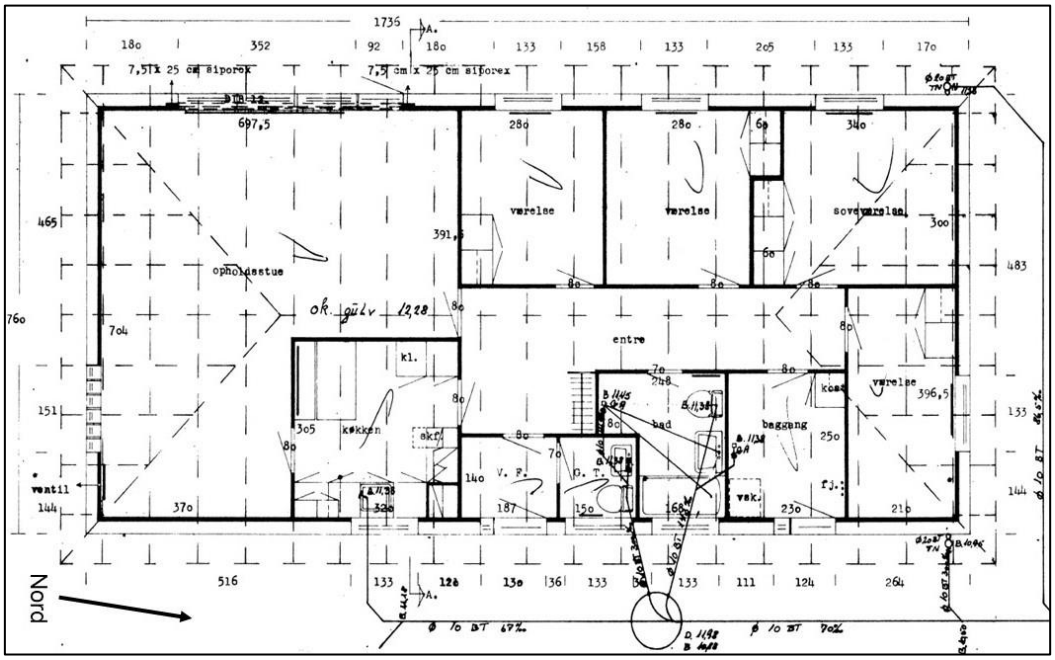
Figur 2. Luftfoto af husets beliggenhed

Overordnet beskrevet, er huset er et længehus med ca. 27 grader valmet tagkonstruktion af gitterspær beklædt med eternitskiffer og ca. 100 mm. isolering mellem spærfødder. Ydervæggene er opført med hulmur bestående af porebeton inderst, hulrum, delvist fyldt med isolering samt en bærende skalmur af tegl. Terrændækket består af et kapillarbrydende lag samt et betonlag. I opholdsrum er gulvopbygningen udført som gulv på strøer. I øvrige rum er gulvet udfør med slidlag og klinker. Husets skillevægge er ligeledes udført i porebeton. Lofter er beklædt med gipspaneler, dog med træpaneler i stuen. Materiale- og konstruktionsbeskrivelser fremgår af bilag 1.



Figur 3. Facadeopstalter og snit.

Huset har et bruttoetageareal på 132 m^2, og er indrettet med tre værelser, soveværelse, entre *(gang)*, opholdsstue, køkken, bryggers, bad, gæstetoilet samt vindfang *(pæn indgang)*. Huset er orienteret med opholdsstuen i sydlig retning, og roteret ni grader mod nord nordvest. Husets indretning og beliggenhed fremgår af bilag 1.



Figur 4. Plantegning

5.1 Husets hoveddata og generelle forudsætninger

Nedenfor beskrives mere detaljerede informationer om huset, samt hvordan disse er anvendt i forbindelse med beregning af de energitekniske forhold i Be18.

Følgende hoveddata er anvendt i Be18 til beregning af energiramme og -behov for de eksisterende forhold, de fremgår ligeledes af bilag 2. Beregningsfilen fremgår af bilag 3.

Tabel 1. Husets hoveddata

Bygningstype	Fritliggende bolig
Opvarmet etageareal [m^2]	132
Opvarmet kælder [m^2]	0
Bebygget areal [m^2]	132
Varmekapacitet [1)] [Wh/K m^2]	53
Brugstid [timer/ uge]	168
Rotation, °	351
Start, kl.	0
Slut, kl.	24
Basisvarmeforsyning	Fjernvarme
Bidrag fra andre systemer	Ingen
Mekanisk køling, andel af etageareal	0

1) *Beregning af varmekapacitet fremgår af bilag 4.*

Huset beregnes med de generelle forudsætninger, der er beskrevet for rumtemperaturer i SBi-anvisning 213 kapitel 3. Det er værd at bemærke, at setpunktet for rumopvarmning *(θ_{opv})* er 20 °C, hvilket er månedlig gennemsnitstemperaturen i alle rum i alle årets måneder.

5.2 Husets klimaskærm og tekniske installationer

I dette afsnit beskrives overordnet husets klimaskærm og tekniske installationer, som har indflydelse på energibehovet. I bilag 2 fremgår punkt for punkt, hvorledes de er indtastet i Be18.

Oplysninger på det eksisterende tegningsmateriale, som fremgår af bilag 1 vedr. husets konstruktioner, er sammenholdt med den virkelige opbygning ved visuel inspektion og opmåling d. 17. februar 2022. Der blev ved inspektionen fundet enkelte afvigelser i forhold til tegningsmaterialet, som har energitekniske konsekvenser, disse er følgende:

Tabel 2. Afvigelser fra tegningsmateriale

Konstruktion	Beskrivelse på tegningsmateriale	Virkelig opbygning
Ydervægge[1)]	½ sten gule sten Isolering 50 mm rockwool 7,5 cm siporex *(porebeton)*	½ sten røde sten Ca. 67 mm hulrum Isolering 50 mm rockwool 7,5 cm siporex *(porebeton)*

1) *Ydervægge under vinduer i værelser og soveværelse er udført som brystningsvægge uden 67mm hulrum.*

Konstruktionerne og bygningsdele er nummereret efter sfb-systemet i kategorierne (1.) bygningsbasis, (2.) Primære bygningsdele samt (3.) Komplettering. Husets tekniske installationer er ikke nummereret. I bilag 4 fremgår resultaterne af opmålinger, U-værdiberegninger samt opslag af linjetabskoefficienter.

Alle transmissionsarealer samt linjetabslængder er opmålt iht. DS 418 kap. 3.6.

Ydervægge, tage og gulve

Fladetab gennem ydervægge, tage, gulve, vinduer og døre er beregnet iht. DS 148 kap. 6. Disse beregninger fremgår af bilag 4. Derudover fremgår de enkelte konstruktioner med opbygninger og materialer med tekst og skitser af samme bilag. Hvor materialernes densiteter og varmeledningsevner ikke er kendt, er der gjort rimelige antagelser.

Fundamenter og samlinger ved vinduer

Linjetabskoefficienter er tabelopslag iht. DS 148 kap. 6. Henvisninger til opslag af de enkelte anvendte værdier fremgår af bilag 4.

Vinduer og yderdøre

Husets vinduer og yderdøre er registreret og opmålt ved fysisk inspektion, hvor der ikke blev fundet væsentlige afvigelser i forhold til det eksisterende tegningsmateriale.

U-værdierne er beregnet iht. DS 418 kap. 6.8. U-værdierne for ruder er fastsat ved tabelopslag i Kompendium 2: Forenklede metoder til bestemmelse af energimærkedata, tabel 3. (BYG-DTU, 1999)

Uopvarmede rum

Ej relevant for projektet

Ventilationsforhold

Hele huset er forsynet med naturlig ventilation i alle rum. Der er oplukkeligt vindue eller dør i alle rum, undtagen i entreen (gangen). Der er flere udeluftventiler i opholdsrum med en samlet fri åbning på ca. 97 cm^2 pr. 25 m^2 gulvareal, hvor kravet jf. vejledningsteksten til BR-18 kap. 22 er 60 cm^2 pr. 25 m^2 gulvareal.

I forhold til vejledningsteksten til BR-18 kap 22 afviger ventilationsforholdene i huset fra følgende: I køkkenet, bad og gæstetoilettet er der ikke en åbning på mindst 100 cm^2 mod adgangsrummet. I gæstetoilettet har aftrækskanalen et kanaltværsnit på 150 cm^2, hvor kravet i vejledningsteksten til BR-18 kap 22 er 200 cm^2 (Bolig- og Planstyrelsen, 2022). Af denne årsag kan huset ikke bringes i renoveringsklasse 1, uden at ventilationsforholdene bliver forbedret.

I Be18 beregnes huset med et luftskifte på 0,3 l/s m^2 incl. infiltration, hvilket svarer til et luftskifte på ca. 0,5 gange pr. time. Dette gøres selvom huset med overvejende sandsynlighed ikke opfylder tæthedskravet jf. BR-18. Tidligere studier har også vist, at lufttætheden i eksisterende boliger kan variere meget, hvilket bl.a. beskrives i rapporten Tæthed i eksisterende bygninger, SBi2015:25 (Bergsøe, 2015). Husets korrekte luftskifte kunne f.eks. være fastsat med målinger med sporgasmetoden, imens husets lufttæthed kunne være fastsat med blowerdoortest.

Den naturlige ventilation om sommeren er beregnet for hele huset til 1,1 l/s m^2. Beregningerne er foretaget ud fra åbningsarealer jf. SBi-anvisning 213 kap. 6.4. Beregningerne fremgår af bilag 4.

De tekniske data for den eksisterende emhætte med afkast til det fri, er fastsat ud fra produktkataloger og litteratur fra husets opførselstidspunkt. Luftstrømmen er fastsat til 60 l/s. Med emhættens aktuelle placering i et mindre aflukket køkken, vandret med en hældning på ikke mere end 15°, og en afstand over kogepladerne på mere end 60 cm og mindre end 90 cm fra kogepladen, overholder emhætten bygningsreglementets krav på 53 l/s ud fra tabellen med præaccepterede korrektionsfaktorer for emhætteplacering og minimums luftmængde jf. vejlednings-teksten til BR-18 kap 22 (Bolig- og Planstyrelsen, 2022). Selvom kravet er 53 l/s regnes der med 60 l/s, da en difference på 7 l/s kun vil give en forøgelse af det samlede energibehov på 0,1 kWh/m^2 år. Dette gøres uagtet ordlyden i vejlednings-teksten til BR-18 kap 22: *"Hvis en emhætte er i stand til at udsuge en luftmængde større end den, der er nødvendig for at overholde bygningsreglementets krav, er det ikke nødvendigt at dokumentere forhold som f.eks. energiforbrug eller træk i forhold til denne yderligere luftmængde"* (Bolig- og Planstyrelsen, 2022).

Det specifikke elforbrug er fastsat til 0,6 KJ/m^3. Der regnes med en driftstid (Fo) på 2% iht. Rettelsesblad til SBi-anvisning 213 (Build, Aalborg universitet, 2022).

Internt varmetilskud

Det interne varmetilskud i huset består af varmetilskud fra personer og apparater incl. belysning. I Be18-beregningen anvendes standardværdier iht. SBi-anvisning 213 kap. 7

Belysning

Ej relevant for projektet, da elforbruget til belysning kun regnes med til andre bygninger end boliger jf. SBi-anvisning 213 kap 8.

Varmefordelingsanlæg

Husets varmefordelingsanlæg er et indirekte to-strengsystem med varmeveksler, som er koblet på fjernvarme, radiatorer, cirkulationspumpe og ekspansionsbeholder.

Fremløbs- og returtemperaturer er fastsat til 70 og 40 grader, hvilket er standardindstillinger i Be18. Disse temperaturer er ligeledes de samme som er beskrevet i Håndbog for Energikonsulenter (HB2021) afsnit 4.7.11.2 (Energistyrelsen, 2022).

Cirkulationspumpen som cirkulerer varmen rundt, er en Grundfoss UPS 15-40 flertrinspumpe med manuel indstilling, der er i konstant drift i opvarmningssæsonen.

Varmt brugsvand

Det varme brugsvand bliver opvarmet gennem varmeveksler, som er koblet på fjernvarme.

I Be18 beregnes med 250 liter varmt brugsvand pr. m^2 opvarmet etageareal pr år med en temperatur på 55 °C.

Fjernvarme

Husets er forsynet med fjernvarme, som er varmekilde for varmefordelingsanlægget og det varme brugsvand, som opvarmes gennem varmeveksler, der er placeret i bryggerset.

Da huset er forsynet med fjernvarme anses det for, at der er en andel af vedvarende energi i den samlede energiforsyning til bygninger iht. BR-18 §280 pkt. 3.

6 Resultater og analyse for eksisterende forhold

De energitekniske resultater, som er beregnet med Be18 for husets eksisterende forhold præsenteres først overordnet i dette afsnit. Derefter analyseres resultaterne med det formål at danne en plan til at bringe huset i renoveringsklasse 1 og 2.

Energirammerne er beregnet iht. BR-18 §281.Det samlede energibehov er energibehovet til varme og el til bygningsdrift ganget med de aktuelle primære energifaktorer iht. BR-18 §252. Overtemperatur i rum er det ækvivalente elbehov til at fjerne overtemperaturerne med et standard køleanlæg med en COP-værdi på 3,0. På dette elbehov ganges ligeledes den primære energifaktor for el på 1,9 som alt andet elforbrug til bygningsdrift.

Resultaterne for husets samlede energi-rammer og behov er følgende:

Tabel 3. Energi-rammer og behov for eksisterende forhold

Energi-rammer og behov	**kWh/m² år**
Renoveringsklasse 1, samlet energiramme	65,0
Renoveringsklasse 2, samlet energiramme	86,7
Samlet energibehov	146,6
Bidrag til energibehov	
Varme	164,8
El til bygningsdrift	2,7
Overtemperatur i rum	1,4

Det samlede energibehov skal bringes lig med eller under energirammerne, men samtidigt reduceres med 30 kWh/m² år for at huset kan bringes i renoveringsklasse 1 eller 2. Bidragene til energibehovet er primærenergien.

Husets samlede dimensionerende transmissionstab er varmetabet gennem husets klimaskærm, beregnet med de dimensionerende temperaturer, viser hvor der i klimaskærmen tabes mest varme. Det samlede dimensionerende transmissionstab kan også anvendes til at fastlægge en varmegivers ydelse, eks. Et fyr.

Resultaterne er følgende:

Tabel 4. Dimensionerende transmissionstab

Dimensionerende transmissionstab	**W**	**W/m²**	**%**
Ydervægge, tage og gulve	3604	27,3	44,4
Fundamenter og samlinger ved vinduer	669	5,1	8,3
Vinduer og yderdøre	2252	17,1	27,8
Ventilationstab uden VGV *(om vinteren)*	1584	12,0	19,5
I alt	**8109**	**61,4**	**100,0**

Varmetilskuddet i huset består af solindfald, internt varmetilskud fra personer og apparater incl. Belysning, rør og varmtvandsbeholder i konstant drift, samt variable tilskud fra rør, hvor det afhænger af opvarmningsperiodens længde. Varmetilskuddet varierer måned for måned, hvor solindfaldet og variable tilskud fra rør udgør den største variation.

Varmetilskuddet kan forsage overophedning i huset, hvilket kan give udslag i resultat ”overtemperatur i rum”. Derfor bør overophedningen reduceres af hensyn til komfort i

huset, men samtidig for at nedbringe værdien for ”overtemperatur i rum”, da det ikke er reel energi der bruges på bygningsdrift, men bliver medregnet i det samlede energibehov.

Varmetilskuddet i huset er følgende:

Tabel 5. Varmetilskud pr. år

Varmetilskud pr. år	**MWh**	**kWh/m²**	**%**
Solindfald	4,58	34,7	30,5
Internt tilskud	5,78	43,8	38,5
Fra rør og VVB konstant drift	2,20	16,7	14,7
Variable varmetilskud fra rør	2,45	18,6	16,3
I alt	**15,01**	**113,7**	**100,0**

For at finde det mest solbelaste rum mht. sommerkomfort, er der ikke lavet beregninger for følgende rum: Entre *(gang)*, bryggers, bad, gæstetoilet samt vindfang *(pæn indgang)*. Disse rum er ikke medregnet, da de ikke betragtes som værende opholdsrum. På den måde er rummenes funktion taget i betragtning ved fastlæggelse af temperaturniveauer, som beskrevet i vejledningsteksten til BR-18 §386 (Bolig- og Planstyrelsen, 2022).

Tabel 6. Sommerkomfort, mest solbelastede rum

Sommerkomfort, mest solbelastede rum	**Antal timer over 27 °C**	**Antal timer over 28 °C**
Værelse 1	0	0
Værelse 2	5	0
Værelse 3	11	0
Soveværelse	0	0
Opholdsstue	56	18
Køkken	3	0

Ifølge BR-18 §386 gælder følgende: *”For boliger, hvor der er mulighed for at åbne vinduer og skabe udluftning, kan bestemmelsen normalt anses som overholdt, når der gennem beregning kan påvises, at der maksimalt er 100 timer pr. år af brugstiden, hvor rumtemperatur overskrider 27 °C og 25 timer pr. år, hvor rumtemperaturen overskrider 28 °C.”* (Bolig- og Planstyrelsen, 2022). Ingen af rummene overskrider disse timeantal, men de kan ændres ved ændringer i klimaskærmen.

Ved beskrivelse af de enkelte energirenoveringstiltag i afsnit 7, følges der løbende op på udviklingen af de ovenfor beskrevne resultater i Tabel 3 til Tabel 6.

6.1 Analyse af resultater

For at fastlægge en strategisk plan til at bringe huset i renoveringsklasse 1 og 2, analyseres de enkelte resultater der er beregnet nærmere nedenfor.

I Tabel 4 ses, at det dimensionerende transmissionstab fra ydervægge, tage og gulve udgør 44,4% af det samlede dimensionerende transmissionstab. Denne andel består af transmissionstab gennem 12 forskellige bygningsdele, hvor 21.1 Ydervæg 300 mm og 27.1 Tagkonstruktion udgør 33,3 og 42,0%. Fordelingen er således:

Tabel 7. Dimensionerende transmissionstab fra ydervægge, tage og gulve i detaljer

Dimensionerende transmissionstab fra ydervægge, tage og gulve i detaljer	**W**	**%**
13.1 Terrændæk med strøgulv	298	8,3
13.2 Terrændæk med slidlag	81	2,2
13.3 Terrændæk under skillevægge	12	0,3
21.1 Ydervæg 300 mm	1200	33,3
21.1 Ydervæg 300 mm (bag radiator)	85	2,4
21.2 Ydervæg (brystning) 225 mm	40	1,1
21.2 Ydervæg (brystning) 225 mm (bag radiator)	106	3,0
21.3 Ydervæg (søjle) 300 mm	20	0,6
21.4 Ydervæg (rem) 260 mm	192	5,3
27.1 Tagkonstruktion	1512	42,0
35.1 Loftlem	42	1,2
31.1 Skarnkasse	16	0,4
I alt	**3604**	**100,0**

Denne fordeling viser hvor i ydervægge, tage og gulve der er det største transmissionstab, og dermed hvor der bør fokuseres ved forbedringer. Transmissionstabet gennem terrændækket udgør samlet 10,8%, hvilket viser at en energiforbedring af dette har en ringe effekt på husets samlede varmetab.

Udover transmissionstab gennem ydervægge, tage og gulve, udgør vinduer og yderdøre 27,8% og ventilationstab uden VGV *(om vinteren)* 19,5% af det samlede dimensionerende transmissionstab. Transmissionstab ved fundamenter og samlinger ved vinduer udgør kun 8,3% af det samlede transmissionstab, derfor bør det primære fokus ikke placeres her i forhold til energioptimering.

Vinduer og yderdøre bidrager samtidigt med 30,5% af det samlede varmetilskud. Ved analyse af de bagvedliggende data ses det, at ca. 44% af varmetilskuddet gennem vinduer og yderdøre er i juni, juli og august måned, hvor der ikke er behov for rumopvarmning. Derfor kan en udskiftning af vinduer og yderdøre både bidrage til en reduktion af varmetab, samt en reduktion af overtemperatur i rum, herunder overskridelse af timer, hvor rumtemperaturen overskrider 27 og 28 °C.

Ud over varmetilskud fra solindfald gennem vinduer og yderdøre, udgør varmetilskud fra installationer tilsammen 31% af det samlede varmetilskud. En reduktion af dette varmetilskud, vil bidrage til et mindre energibehov til varme samt et fald ”overtemperatur i rum”.

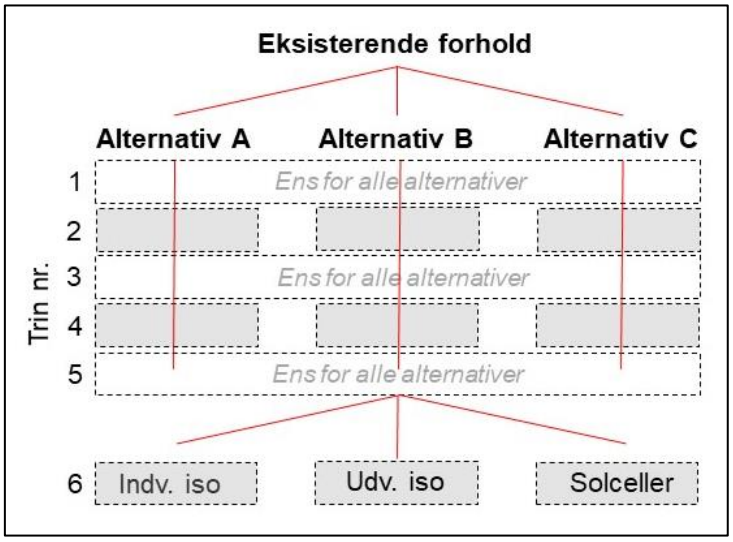
7 Plan mod renoveringsklasse 1 og 2

Ud fra resultaterne og analyserne af disse for husets energimæssige forhold, beskrives planen for hvordan det kan bringes i renoveringsklasse 1 og 2.

Som beskrevet i afsnit 3 har det fra projektets start været en målsætning, at renoveringstiltagene, der regnes på, er realistiske, og kan udføres i virkeligheden. Derfor regnes der med allerede kendte materialer og byggeteknikker.

Energirenovering af terrændækket indgår ikke i planen for at bringe huset i renoveringsklasse 1 og 2. Årsagen til dette er, at alle skillevægge står på betondækket, hvilket vanskeliggør en god praktisk udførsel af efterisolering. Derudover udgør terrændækket 10,8% af det samlede dimensionerende transmissionstab for ydervægge, tage og gulve, og dermed kun udgør en meget lille del af husets samlede transmissionstab. Det vurderes derfor, at dette renoveringstiltag ikke er rentabel.

Projektet med at bringe huset til renoveringsklasse 1 og 2 er delt op i tre alternativer - A, B og C. Disse tre alternativer indeholder i alt seks trin. Indholdet i trin 1, 3 og 5 er ens for de tre alternativer, men i trin 2 og 4 er der forskelle i de tre alternativer. Det sjette trin indeholder tre forskellige muligheder for at bringe huset helt i renoveringsklasse 1. De tre forskellige muligheder er ens i de tre alternativer. Denne organisation giver derfor ni forskellige muligheder for at huset kan bringes i renoveringsklasse 1.



Figur 5. Projektets organisering med alternativ A, B og C

De tre alternativer - A, B og C er udførselsmæssigt og økonomisk forskellige. Alternativ A er tænkt som den billigste løsning, hvor investeringsprisen og energibesparelse er det primære fokus, frem for eksempelvis godt indeklima og bygningsfysiske udfordringer. Alternativ B er den løsning, hvor investeringsprisen er lidt højere, fordi der har været større fokus på indeklima og bygningsfysiske udfordringer. Alternativ C har den højeste investeringspris, men her har der også været det største fokus på energibesparelse, godt indeklima og bygningsfysiske udfordringer.

Indholdet i de enkelte alternativer og trin er beskrevet overordnet i nedenstående tabel. En mere teknisk beskrivelse af de enkelte trin, samt argumentation fremgår af de næste delafsnit, sammen med de resultater de giver i Be18.

Tabel 8. Indhold i alternativ A, B og C

Trin nr.	Alternativ		
	A	**B**	**C**
1	Udskiftning af alle vinduer og yderdøre		
2	Efterisolering af loft. Ny loftlem. Den eksisterende alu-kraftfolie bevares.	Efterisolering af loft. Ny loftlem. Ny dampspærre og nye lofter etableres.	Efterisolering af loft. Ny loftlem. Ny dampspærre og nye lofter etableres.
3	Indblæsning af hulmursisolering. Skarnkasse tilmures		
4	Etablering af åbningsarealer og større aftrækskanal.	Etablering af åbningsarealer og større aftrækskanal. Etablering af mekanisk udsugning i bryggers, bad og gæstetoilet. Udskiftning af emhætte.	Etablering af åbningsarealer Etablering af mekanisk ventilationsanlæg. Udskiftning af emhætte. Huset tæthedsprøves
5	Varmefordelingsanlæg laves om til direkte fjernvarme. Cirkulationspumpe udskiftes. Etablering af vejrkompensering.		
6	Etablering af indvendig efterisolering. *Eller* Etablering af udvendig efterisolering. *Eller* Etablering af solcelleanlæg.		

7.1 Trin 1, udskiftning af vinduer og yderdøre

I afsnit 6.1 blev en udskiftning af vinduer og yderdøre fremhævet som et tiltag, der kan bidrage til både at reducere varmetabet samt varmetilskuddet. Derfor er dette det første trin, som er gældende for alternativ A, B og C. En udskiftning af vinduer og yderdøre kan have flere effekter som eksempelvis:

- Et lavere varmetab som giver et lavere energibehov
- Et mindre solindfald som reducerer overtemperaturen i huset samt øger sommerkomforten i det mest solbelastede rum
- En tættere klimaskærm som reducerer trækgener og kuldenedfald
- En højere overfladetemperatur ved rammer og karme, der kan reducere muligheden for skimmelvækst på vinduer og yderdøre

En ulempe ved at gøre klimaskærmen tættere, er at beboerne i huset skal have et øget fokus på at lufte regelmæssigt ud, for at opretholde en god luftkvalitet og holde den relative luftfugtighed på et fornuftigt niveau.

Ved udskiftning af hele bygningsdele skal BR-18 §277 overholdes. I denne bestemmelse henføres til §279, hvor der står: ”Vinduer, glasydervægge, døre, glastage og ovenlysvinduer skal leve op til kravene i §§ 257 og 258” (Bolig- og Planstyrelsen, 2022). Dette betyder at de nye vinduer og yderdøre skal leve op til disse krav:

§257:

- Yderdøre, maks. U-værdi på 1,0 W/m^{2}K ved referencestørrelse er 1,23 m x 2,18 m.
- Samling mellem ydervæg og vinduer eller yderdøre, porte og lemme, maks. Linjetab på 0,06 W/mK.

§258:

- Vinduer, glasydervægge, ovenlysvinduer og glastage skal overholde følgende krav til energimæssig ydeevne: For vinduer og glasydervægge må energibalancen for referencevinduet ikke være mindre end 0 kWh/m^2 pr. år. Energibalancen beregnes som Eref = 196,4 x gw – 90,36 x Uw.
- Referencestørrelsen for vinduer, glasydervægge, ovenlysvinduer og glastage er 1,23 m x 1,48 m.

I dette projekt er der regnet der med vinduer og yderdøre af samme form og udseende som de eksisterende. Med tanke på husets beliggenhed og vedligeholdelsesudgifter er der er dog regnet med karm/rammesystem af træ/alu. Referencevinduet, der er brugt i beregningerne, er energiklasse A med en E-ref-værdi på +11,3 kWh/m^2, hvilket betyder at der lukkes mere energi ind end der lukkes ud. Yderligere informationer vedr. referencevinduet samt U-værdiberegninger for de nye vinduer og yderdøre fremgår af bilag 5. Til linjetabet for samlingerne mellem ydervæg og vinduer eller yderdøre er der regnet med 0,005 W/mK for huset med eksisterende forhold. Da der ikke ændres konstruktivt på samlingen anvendes det samme linjetab ved trin 1.

Af nedenstående tabel fremgår, hvilke ændringer der er for vinduer og yderdøres U- og g-værdier, samt hvordan de er indtastet i Be18. De værdier der fremgår i Be18, men ikke er i tabellen er ikke ændret. Be18-beregningerne fremgår af bilag 5-A1, bilag 5-B1 samt bilag 5-C1.

Tabel 9. Ændringer i Be18 for vinduer og yderdøre i trin 1

Vinduer og yderdøre	**Eksist. vinduer og yderdøre**		**Nye vinduer og yderdøre**	
	U (W/m²K)	g (-)	U (W/m²K)	g (-)
31.2 Vindue (V.1.1) 1,31x1,31 m	2,62	0,76	0,78	0,53
31.2 Vindue (V.1.2) 1,31x1,31 m	2,62	0,76	0,78	0,53
31.2 Vindue (V.1.3) 1,31x1,31 m	2,62	0,76	0,78	0,53
31.2 Vindue (V.1.4) 1,31x1,31 m	2,62	0,76	0,78	0,53
31.2 Vindue (V.1.5) 1,31x1,31 m	2,62	0,76	0,78	0,53
31.3 Vindue (V.2.1) 1,31x1,31 m	2,62	0,65	0,78	0,45
31.4 Vindue (V.3.1) 1,31x0,72 m	2,51	0,76	0,88	0,53
31.5 Vindue (V.4.1) 3,53x1,49 m	2,78	0,76	0,70	0,53
31.6 Vindue (V.5.1) 1,48x2,24 m	2,83	0,76	0,65	0,53
31.7 Terrassedør (D.1.1) 0,89x2,24 m	1,95	0,76	0,88	0,53
31.8 Facadedør (D.2.1), 1,27x2,24 m	2,00	0,76	1,03	0,53
31.9 Facadedør (D.3.1), 1,27x2,24 m	2,05	0,76	0,74	0,53

Note: *For 31.3 Vindue (V.2.1) Da glasset er matteret, er g-værdierne fastsat ved rimelige antagelser.*

I Tabel 10 nedenfor er resultaterne for husets samlede energibehov og bidragene dertil efter udskiftning af vinduer og ydervægge angivet.

Reduktionen i vinduer og yderdørenes U-værdier betyder, at varmetabet bliver reduceret. Varmetilskuddet via solindfald bliver ligeledes reduceret, da g-værdierne reduceres. Disse ændringer har en positiv effekt på det samlede energibehov, som falder med 25,6 kWh/m^2 år. Dette fald stammer primært fra en reduktion i varmebehovet på 29,8 kWh/m^2 år. Det ækvivalente elbehov til at fjerne overtemperaturerne med et standard køleanlæg falder med 0,2 kWh/m^2 år.

Tabel 10. Energi-rammer og behov efter trin 1

Energi-rammer og behov	**kWh/m^2 år**	
Renoveringsklasse 1, samlet energiramme	65,0	
Renoveringsklasse 2, samlet energiramme	86,7	
	Eksist. forhold	**Efter trin 1**
Samlet energibehov	146,6	121,0
Bidrag til energibehov		
Varme	164,8	135,0
El til bygningsdrift	2,7	2,7
Overtemperatur i rum	1,4	1,2

Af Tabel 11 nedenfor fremgår det, at det dimensionerende transmissionstab fra vinduer og yderdøre er faldet med cirka 69%, hvilket betyder, det samlede dimensionerende transmissionstab er faldet med ca. 19% til 6561 W, hvilket er en direkte konsekvens af forbedrede U-værdier for vinder og yderdøre. Den primære forbedring ved de nye vinduer og yderdøre er termoruderne. De har tre lag glas med gasarten argon imellem hinanden,

et forbedret kantprofil samt lavemissionsbelægning. Disse tre forbedringer giver tilsammen et meget lavere varmetab. Det dimensionerende transmissionstab fra øvrige bygningsdele er ikke ændret, derfor fremgår de ikke af tabellen.

Tabel 11. Dimensionerende transmissionstab for vinduer og yderdøre efter trin 1

Dimensionerende transmissionstab	**Eksist. forhold**		**Efter trin 1**	
	W	**W/m²**	**W**	**W/m²**
Vinduer og yderdøre	2252	17,1	704	5,3
I alt	**8109**	**61,4**	**6561**	**49,7**

Reducerede g-værdier for vinduer og yderdøre giver ligeledes en reduktion i varmetilskuddet via solindfald på ca. 30%, hvilket fremgår af Tabel 12. Dette skyldes, at termoruderne i de nye vinduer og yderdøre er produceret med levemissionsbelægning, som reflekterer en stor del af solens varmestråler tilbage, så de ikke bidrager med varmetilskud i huset. Lavemissionsbelægningen bidrager ligeledes til at reducere varmetab, da de infrarøde varmestråler reflekteres tilbage i huset. Da varmetabet gennem vinduer og yderdøre er reduceret, er varmebehovet også faldet. Det giver et lille fald i det variable varmetilskud fra rør, hvor det afhænger af opvarmningsperiodens længde. Det interne varmetilskud samt varmetilskud fra rør og VVB er ikke ændret, derfor fremgår de ikke af tabellen.

Tabel 12. Varmetilskud pr. år efter trin 1

Varmetilskud pr. år	**Eksist. forhold**		**Efter trin 1**	
	MWh	**kWh/ m²**	**MWh**	**kWh/m²**
Solindfald	4,58	34,7	3,19	24,2
Variable varmetilskud fra rør	2,45	18,6	2,43	18,4
I alt	**15,01**	**113,7**	**13,60**	**103,0**

Tabel 13 nedenfor viser, at det reducerede varmetilskud via solindfald giver en direkte påvirkning på sommerkomforten i opholdsstuen, som tidligere er beregnet til det mest solbelastede rum. Antallet af timer hvor rumtemperaturen er over 27 °C er faldet med 38 timer til 18 timer. Der er samtidigt sket et fald på 21 timer hvor rumtemperaturen er over 28 °C til 2 timer.

Tabel 13. Sommerkomfort, mest solbelastede rum, opholdsstuen efter trin 1

Sommerkomfort, mest solbelastede rum. Antal timer over	**Eksist. forhold**		**Efter trin 1**	
	27 °C	**28 °C**	**27 °C**	**28 °C**
Opholdsstue	56	18	23	2

I forbindelse med udskiftning af vinduer og yderdøre, er der en række følgearbejder som ikke har nogen energiteknisk negativ konsekvens, hvis de bliver udført korrekt. Hvis de derimod udføre mangelfuldt, vil huset være utæt med en større infiltration til følge og risiko for bygningsskader. De skal dog medregnes økonomisk i etableringsomkostningerne vedr. trin 1. Dette beskrives nærmere i afsnit 10.1. Disse følgearbejder er:

- Udskiftning af udvendige fuger
- Udskiftning af vinduesbundstykke indendørs
- Udskiftninger af indvendige lysninger incl. indfatninger
- Malerarbejde i forbindelse med ovenstående.

Efter udskiftning af vinduer og yderdøre er status for bringe huset i renoveringsklasse 1 og 2 for alternativ A, B og C følgende:

Tabel 14. Krav til opfyldelse jf. BR-18 §§ 280-281 efter trin 1

Krav der skal opfyldes for at opnå renoveringsklasser jf. BR-18 §§ 280-281	**Renoverings-klasse 1**			**Renoverings-klasse 2**		
Samlet energiramme [kWh/m² år]	*65,0*			*86,7*		
Alternativ	**A**	**B**	**C**	**A**	**B**	**C**
Overholdelse af energiramme	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Reduktion med mindst 30,0 kWh/m² pr. år. af behovet for tilført energi	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Eftervisningen iht. SBi-anvisning 213 Bygningers energibehov med Be18	✓	✓	✓	✓	✓	✓
En andel af vedvarende energi i den samlede energiforsyning til huset som er fjernvarme	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Overholdelse af BR-18 §§ 382-384 vedr. belysning	*Ej aktuel*			*Ej aktuel*		
Overholdelse af BR-18 § 386 vedr. termisk indeklima	✓	✓	✓	*Ej aktuel*		
Overholdelse af BR-18 §§ 443-449 vedr. ventilation	✗	✗	✗	*Ej aktuel*		

7.2 Trin 2, efterisolering af tagkonstruktion

Resultaterne af beregningen i Be18 for husets eksisterende forhold viste, at det primære bidrag til energibehovet for huset er opvarmning. Ved nærmere analyse viste det sig i afsnit 6.1, at det dimensionerende transmissionstab gennem tagkonstruktionen udgør 42% af det samlede dimensionerende transmissionstab gennem ydervægge, tage og gulve ved husets eksisterende forhold. Ud fra dette faktum sammenholdt med, at efterisolering af tagkonstruktionen er et overskueligt renoveringstiltag, er det det valgt som det andet trin mod at få huset bragt i renoveringsklasse 1 og 2.

Af Tabel 8 fremgår det, at der er forskel på dette renoveringstiltag i alternativ A, B og C.

I alternativ A efterisoleres tagkonstruktionen med 300 mm glasuldsgranulat incl. etablering af vindspærre og hævning af gangbroen. Derudover udskiftes loftlemmen. Den eksisterende alu-kraftfolie og loftbeklædning bevares. Denne løsning er valgt i alternativ A, da formålet med dette alternativ skal være den billige løsning. I afsnit 9 præsenteres analyse og resultater vedr. bygningsfysiske problemstillinger omkring kondensering i konstruktionen ved anvendelse af den eksisterende alu-kraftfolie.

I alternativ B og C efterisoleres tagkonstruktionen ligeledes med 300 mm glasuldsgranulat incl. etablering af vindspærre og hævning af gangbroen. Ligeledes udskiftes loftlemme. Der etableres en ny dampspærre af PE-folie samt ny loftbeklædning. I disse to alternativer er der valgt at udskifte den eksisterende alu-kraftfolie til en ny dampspærre af PE-folie, da der er større fokus på bygningsfysiske udfordringer i disse alternativer.

Efterisolering af tagkonstruktionen samt udskiftning af loftlemmen kan have flere effekter som eksempelvis:

- Et lavere varmetab som giver et lavere energibehov
- En tættere klimaskærm som reducere trækgener og kuldenedfald
- Mindre mulighed for sortsværtning ved loftkanter pga. kuldebroer

Ved etablering af en ny dampspærre gøres husets klimaskærm tættere. Det betyder, at husets beboere skal have et øget fokus på at lufte regelmæssigt ud, for at opretholde en god luftkvalitet og holde den relative luftfugtighed på et fornuftigt niveau.

Da der ikke er tale om en udskiftning af en hel bygningsdel, og husets energibehov eftervises ved renoveringsklasserne jf. BR-18 §§ 280-282, er der ikke noget U-værdikrav til efterisoleringen af tagkonstruktionen. Dog må efterisoleringen ikke bidrage til akkumulering af fugt som følge af fugttransport fra indeluften som beskrevet i BR-18 §§ 334-335.

Ved beregning af U-værdi for tagkonstruktionen med efterisolering, er der beregnet med alu-kraftfolie, 25 mm spredt forskalling og 15 mm loftbeklædning. Den samlede U-værdi incl. 300 mm efterisolering er beregnet til 0,10 W/m^{2}K. Da det vurderes, at det ikke har nogen praktisk betydning, anvendes denne U-værdi også for alternativ B og C, hvor der er ny dampspærre og loftbeklædning. Ved efterisolering af tagkonstruktionen, ændres linjetabet ved samling mellem samlingen af tag og væg sig. Den nye loftlem er en smule større end den gamle, derfor er arealerne ikke magen til hinanden før og efter trin 2. U-værdiberegning samt anden teknisk dokumentation vedr. trin 2 fremgår af bilag 6.

Af Tabel 15 nedenfor fremgår hvilke ændringer der er foretaget i Be18 i forbindelse med trin 2. De værdier der fremgår i Be18, men ikke er i tabellen er ikke ændret. Be18-beregningerne fremgår af bilag 6-A2, bilag 6-B2 samt bilag 6-C2. Ændringerne i dette trin vil medføre en øget tæthed for huset. Dette er dog ikke medregnet i dette trin.

Tabel 15. Ændringer i Be18 for trin 2

Ydervægge, tage og gulve	**Eksist. Arealer og U-værdier**		**Nye Arealer og U-værdier**	
	Areal (m²)	U (W/m²K)	Areal (m²)	U (W/m²K)
27.1 Tagkonstruktion	131,26	0,36	131,03	0,10
35.1 Loftlem	0,64	2,05	0,87	0,81
Fundamenter og samlinger ved vinduer	l (m)	Tab (W/mK)	l (m)	Tab (W/mK)
27.2 Væg-tag samling	49,9	-0,04	49,9	-0,08

Efter trin 1, som indeholder udskiftning af vinduer og yderdøre, blev husets samlede energibehov 121 kWh/m^2 år, som efter trin 2 er faldet til 102 kWh/m^2 år, hvilket betyder at behovet for tilført energi er reduceret med 44,6 kWh/m^2 år. Dette fald stammer fra en reduktion i varmebehovet på 24,8 kWh/m^2 år. Da der en opnået en ændring af opvarmningsbehovet, i forbindelse med efterisolering af tagkonstruktionen er behovet for el til bygningsdrift som primært stammer fra drift af cirkulationspumpen til varmefordelingsanlægget falden med 0,1 kWh/m^2 år til 2,6 kWh/m^2. Det ækvivalente elbehov til at fjerne overtemperaturerne med et standard køleanlæg er derimod steget med 2,1 kWh/m^2 år til 3,3 kWh/m^2 år. Denne stigning er sket fordi varmetabet fra huset er mindre. I Tabel 16 nedenfor er de overordnede resultater efter trin 2 opsummeret.

Tabel 16. Energi-rammer og behov efter trin 2

Energi-rammer og behov	**kWh/m^2 år**	
Renoveringsklasse 1, samlet energiramme	65,0	
Renoveringsklasse 2, samlet energiramme	86,7	
	Eksist. forhold	**Efter trin 2**
Samlet energibehov	146,6	102,0
Bidrag til energibehov		
Varme	164,8	110,2
El til bygningsdrift	2,7	2,6
Overtemperatur i rum	1,4	3,3

Det dimensionerende transmissionstab gennem ydervægge, tage og gulve er efter trin 2 faldet med ca. 31% fra 3604 W til 2492 W. Derudover er der sket et lille fald i linjetab ved fundamenter og samlinger ved vinduer, hvilket fremgår af Tabel 17. Udskiftningen af vinduer og yderdøre sammen med efterisoleringen af tagkonstruktionen betyder, at det dimensionerende transmissionstab er faldet med ca. 33% fra 8109 W til 5449 W. Der er ikke sket ændringer i det dimensionerende transmissionstab gennem vinduer og yderdøre samt ventilationstab, derfor fremgår de ikke af tabellen.

Tabel 17. Dimensionerende transmissionstab for vinduer og yderdøre efter trin 2

Dimensionerende transmissionstab	**Eksist. Forhold**		**Efter trin 2**	
	W	**W/m²**	**W**	**W/m²**
Ydervægge, tage og gulve	3604	27,3	2492	18,9
Fund. og samlinger ved vinduer	669	5,1	605	4,6
I alt	**8109**	**61,4**	**5385**	**40,8**

Da opvarmningsbehovet er ændret pga. efterisolering af tagkonstruktionen, er det variable varmetilskud fra rør, hvor det afhænger af opvarmningsperiodens længde, faldet igen. Det variable varmetilskud påvirker husets varmebalance. Efter trin 1 var det variable varmetilskud på 2,43 MWh pr. år. Det er nu faldet til 2,40 MWh pr. år. De øvrige varmetilskud er ikke ændret.

Da der er en stigning i det ækvivalente elbehov til at fjerne overtemperaturerne med et standard køleanlæg, som angivet i Tabel 16, indikerer det, at antallet af timer, hvor rumtemperaturen er over 27 og 28 °C er steget. Efter trin 1 var der i opholdsstuen, som er fastsat til det mest solbelastede rum, henholdsvis 23 og 2 timer, hvor rumtemperaturen var over 27 og 28 °C. Efter trin 2, som har bevirket, at huset holder bedre på varmen, er antallet af timer steget til 34 og 5. Dette antal timer er dog stadig lavere end udgangspunktet med husets eksisterende forhold, hvilket fremgår af Tabel 18.

Tabel 18. Sommerkomfort, mest solbelastede rum, opholdsstuen efter trin 2

Sommerkomfort, mest solbelastede rum. Antal timer over	**Eksist. Forhold**		**Efter trin 2**	
	27 °C	**28 °C**	**27 °C**	**28 °C**
Opholdsstue	56	18	34	5

De økonomiske omkostninger i forbindelse med udførslen af trin 2 i alternativ A og udførslen af trin 2 i alternativ B og C er beskrevet i afsnit 10.1. Husets energitekniske tilstand i forhold til at blive bragt i renoveringsklasse 1 og 2 er opsummeret i tabellen nedenfor.

Tabel 19. Krav til opfyldelse jf. BR-18 §§ 280-281 efter trin 2

Krav der skal opfyldes for at opnå renoveringsklasser jf. BR-18 §§ 280-281	**Renoverings-klasse 1**			**Renoverings-klasse 2**		
Samlet energiramme [kWh/m² år]	*65,0*			*86,7*		
Alternativ	**A**	**B**	**C**	**A**	**B**	**C**
Overholdelse af energiramme	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Reduktion med mindst 30,0 kWh/m² pr. år. af behovet for tilført energi	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Eftervisningen iht. SBi-anvisning 213 Bygningers energibehov med Be18	✓	✓	✓	✓	✓	✓
En andel af vedvarende energi i den samlede energiforsyning til huset som er fjernvarme	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Overholdelse af BR-18 §§ 382-384 vedr. belysning	*Ej aktuel*			*Ej aktuel*		
Overholdelse af BR-18 § 386 vedr. termisk indeklima	✓	✓	✓	*Ej aktuel*		
Overholdelse af BR-18 §§ 443-449 vedr. ventilation	✗	✗	✗	*Ej aktuel*		

7.3 Trin 3, hulmursisolering

Det tredje trin for at optimere huset, så det kan bringes i renoveringsklasse 1 og 2, er en yderligere optimering af klimaskærmen. Af Tabel 7 i afsnit 6.1 ses det, at det næststørste dimensionerende transmissionstab på 1200 W udgøres af 21.1 Ydervæg 300 mm. Fordi ydervæggen har et hulrum på ca. 67 mm bag skalmuren, er det et tidsmæssigt og økonomisk overskueligt indgreb at optimere på ydervæggen ved at indblæse isolering i hulmuren. På den måde kan husets varmebehov reduceres uden at det tager af den indvendige plads i huset, og uden at der ændres på husets udvendige udtryk. Da der ikke mere er behov for en skarnkasse i forbindelse med dagrenovation, tilmures den så det bliver magen til ydervæggen. Denne forbedring er ens for alternativ A, B og C.

Efterisolering af ydervæggen og tilmuring af skarnkassen kan have flere effekter som eksempelvis:

- Et lavere varmetab som giver et lavere energibehov
- En tættere klimaskærm
- Mindre mulighed for sortsværtning ved konvektive kuldebroer

Der kan dog i forbindelse med efterisolering af hulmuren være forskellige bygningsfysiske udfordringer, som f.eks. frostsprængninger af murværket og korrosion af murbindere. Disse udfordringer behandles i afsnit 9.2.

Da der heller ikke i dette tilfælde er tale om en udskiftning af en hel bygningsdel, og husets energibehov eftervises ved renoveringsklasserne jf. BR-18 §§ 280-282 er der ikke noget U-værdikrav til efterisoleringen af ydervæggen. Dog må efterisoleringen ikke bidrage til akkumulering af fugt som følge af fugttransport fra indeluften som beskrevet i BR-18 §§ 334-335.

U-værdien for ydervæggen er efter efterisoleringen beregnet til 0,30 W/m^{2}K, hvor den ved de eksisterende forhold var 0,50 W/m^{2}K. Linjetabet ved udadgående hjørner ændres fra -0,12 W/mK til -0,11 W/mK. Samlingen mellem væg og tag falder fra -0,08W/mK, som det var efter trin 2 til -0,09W/mK efter trin 3. U-værdiberegning samt teknisk dokumentation vedr. trin 3 fremgår af bilag 7. Af nedenstående tabel fremgår hvilke ændringer der er foretaget i Be18. De værdier der fremgår i Be18, men ikke er i tabellen er ikke ændret. Be18-beregningerne fremgår af bilag 7-A3, bilag 7-B3 samt bilag 7-C3.

Tabel 20. Ændringer i Be18 for trin 3

Ydervægge, tage og gulve	**Eksisterende forhold**		**Efter trin 3**	
	Areal (m²)	U (W/m²K)	Areal (m²)	U (W/m²K)
21.1 Ydervæg 300 mm	75,00	0,50	75,41	0,30
21.1 Ydervæg 300 mm bag radiator	2,74	0,50	2,74	0,30
31.1 Skarnkasse	0,41	1,22	*Udgår, beregnes i stedet som 21.1 ydervæg 300 mm*	
Fundamenter og samlinger ved vinduer	l (m)	Tab (W/mK)	l (m)	Tab (W/mK)
21.3 Ydervæg udadgående hjørner 350 mm	10,3	-0,12	10,3	-0,11
27.2 Væg-tag samling	49,9	-0,04	49,9	-0,09

Husets samlede energibehov var efter trin 2, som indeholder efterisolering af tagkonstruktionen og udskiftning af loftlemmen, på 102,0 kWh/m^2 år. Det er efter trin 3 faldet yderligere til 92,9 kWh/m^2 år. Ligesom i trin 2 stammer faldet i primær energi fra en reduktion i varmebehovet på 11,4 kWh/m^2 år. El-behovet til bygningsdrift er igen faldet med 0,1 kWh/m^2 år til 2,5 kWh/m^2 år, som primært stammer fra drift af cirkulationspumpen til varmefordelingsanlægget. Fordi ydervæggene er blevet efterisoleret, holder huset bedre på varmen. Det bevirker, at det ækvivalente elbehov til at fjerne overtemperaturerne med et standard køleanlæg derimod er steget med 0,8 kWh/m^2 år til 4,1 kWh/m^2 år. I Tabel 21 er de overordnede resultater vedr. energibehov efter trin 3 opsummeret.

Tabel 21. Energi-rammer og behov efter trin 3

Energi-rammer og behov	**kWh/m^2 år**	
Renoveringsklasse 1, samlet energiramme	65,0	
Renoveringsklasse 2, samlet energiramme	86,7	
	Eksist. forhold	**Efter trin 3**
Samlet energibehov	146,6	92,9
Bidrag til energibehov		
Varme	164,8	98,8
El til bygningsdrift	2,7	2,5
Overtemperatur i rum	1,4	4,1

Efter trin 3 er det dimensionerende transmissionstab gennem ydervægge, tage og gulve faldet med ca. 45% fra 3604 W til 1966 W fra husets eksisterende forhold, hvilket fremgår af Tabel 22. Udskiftningen af vinduer og yderdøre, efterisoleringen af tagkonstruktionen samt efterisolering af ydervæggen betyder, at det dimensionerende transmissionstab er faldet med ca. 40% fra 8109 W til 4847 W. Det dimensionerende transmissionstab for vinduer og yderdøre samt ventilationstab fremgår ikke af tabellen, da der ikke er sket nogle ændringer for dem.

Tabel 22. Dimensionerende transmissionstab for vinduer og yderdøre efter trin 3

Dimensionerende transmissionstab	**Eksist. forhold**		**Efter trin 3**	
	W	**W/m^2**	**W**	**W/m^2**
Ydervægge, tage og gulve	3604	27,3	1966	14,9
Fund. og samlinger ved vinduer	669	5,1	593	4,5
I alt	**8109**	**61,4**	**4847**	**36,7**

Det variable varmetilskud fra rør, hvor det afhænger af opvarmningsperiodens længde, er endnu engang faldet fordi opvarmningsbehovet er ændret. Efter trin 2 var det på 2,40 MWh, men er nu faldet til 2,28 MWh. De øvrige varmetilskud er ikke ændret, og fremgår derfor ikke af tabellen. Det Interne varmetilskud fra solindfald, personer og apparater samt fra installationer til varmt brugsvand er ikke faldet yderligere siden husets eksisterende forhold.

I Tabel 21 fremgår det, at ækvivalente elbehov til at fjerne overtemperaturerne med et standard køleanlæg er steget. Den samme tendens gør sig gældende for opholdsstuen, hvor antallet af timer med rumtemperatur over 27 og 28 °C igen er steget. Efter trin 2 var antallet af timer 34 og 5 timer efter trin 3 steget til 37 og 9. Dette antal timer er dog stadig lavere end udgangspunktet med husets eksisterende forhold, hvilket fremgår af Tabel 23 nedenfor.

Tabel 23. Sommerkomfort, mest solbelastede rum, opholdsstuen efter trin 3

Sommerkomfort, mest solbelastede rum. Antal timer over	**Eksist. forhold**		**Efter trin 3**	
	27 °C	**28 °C**	**27 °C**	**28 °C**
Opholdsstue	56	18	37	9

De økonomiske omkostninger i forbindelse med udførslen af trin 3, gældende for alternativ A, B og C er beskrevet i afsnit 10.1. Husets energitekniske tilstand i forhold til at blive bragt i renoveringsklasse 1 og 2 er opsummeret i tabellen nedenfor.

Tabel 24. Krav til opfyldelse jf. BR-18 §§ 280-281 efter trin 3

Krav der skal opfyldes for at opnå renoveringsklasser jf. BR-18 §§ 280-281	**Renoverings-klasse 1**			**Renoverings-klasse 2**		
Samlet energiramme [kWh/m² år]	*65,0*			*86,7*		
Alternativ	**A**	**B**	**C**	**A**	**B**	**C**
Overholdelse af energiramme	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Reduktion med mindst 30,0 kWh/m² pr. år. af behovet for tilført energi	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Eftervisningen iht. SBi-anvisning 213 Bygningers energibehov med Be18	✓	✓	✓	✓	✓	✓
En andel af vedvarende energi i den samlede energiforsyning til huset som er fjernvarme	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Overholdelse af BR-18 §§ 382-384 vedr. belysning	*Ej aktuel*			*Ej aktuel*		
Overholdelse af BR-18 § 386 vedr. termisk indeklima	✓	✓	✓	*Ej aktuel*		
Overholdelse af BR-18 §§ 443-449 vedr. ventilation	✗	✗	✗	*Ej aktuel*		

7.4 Trin 4, ventilationsforhold

Udskiftningen af vinduer og yderdøre samt etablering af ny dampspærre, i forbindelse med energioptimeringstiltag i trin 1 og 2, gør, at husets klimaskærm bliver tættere. Derfor skal husets beboere være opmærksom på at få luftet ud flere gange om dagen, for at holde luftkvaliteten og den relative luftfugtighed på et acceptabelt niveau. Yderligere udgør ventilationstab uden VGV *(om vinteren)* 1584W, hvilket svarer til ca. 19,5% af det dimensionerende transmissionstab ved husets eksisterende forhold iht. Tabel 4. Hvis det kan forbedres, vil der være en besparelse på varmebehovet. Af disse årsager omhandler trin 4 ventilationsforhold.

I afsnit 7 beskrives alternativerne A, B og C som tre forskellige alternativer med forskellige fokus. Alternativ A er tænkt som den billigste løsning, hvor investeringsprisen og energibesparelse er det primære fokus, frem for eksempelvis godt indeklima og bygningsfysiske udfordringer. B er den løsning, hvor investeringsprisen er lidt højere, fordi der har været større fokus på indeklima og bygningsfysiske udfordringer. Alternativ C har den højeste investeringspris, men her har der også været det største fokus på energibesparelse, godt indeklima og bygningsfysiske udfordringer.

Denne differentiering kommer særligt til udtryk i dette renoveringstrin, hvor der sker følgende for de tre alternativer:

Tabel 25. Indhold i trin 4 for alternativ A, B og C

Indhold i trin 4 for alternativ A, B og C	
A:	Etablering af åbningsarealer mod adgangsrum fra bad, gæstetoilet og køkken, samt etablering af større aftrækskanal i gæstetoilet
B:	Etablering af åbningsarealer mod adgangsrum fra bad, gæstetoilet og køkken Etablering af mekanisk udsugning i bryggers, bad og gæstetoilet Udskiftning af emhætte
C:	Etablering af åbningsarealer under alle døre Etablering af mekanisk ventilationsanlæg Udskiftning af emhætte Huset tæthedsprøves

For alternativ A gælder, at der etableres åbningsarealer på mindst 100 cm^2 fra bad, gæstetoilettet samt fra køkkenet mod adgangsrummene. Desuden skal aftrækskanalen i gæstetoilettet udskiftes, så kanaltværsnittet bliver mindst 200 cm^2. Dette gøres for, at husets luftskiftet kan anses at være tilstrækkeligt ved naturlig ventilation iht. BR-18 § 446 samt vejledningsteksten til BR-18 kap. 22, hvilket gør det muligt, at huset kan bringes i renoveringsklasse 1 med naturlig ventilation. Yderligere krav er allerede opfyldt.

En bevarelse samt effektivisering af naturlig ventilation i huset kan have flere fordele f.eks.:

- En lav etableringsomkostning
- Lave vedligeholdelsesomkostninger
- Beboerstyret ventilation efter behov

Der er samtidig en række ulemper forbundet med naturlig ventilation, f.eks.:

- Varmetab
- Ujævn ventilation over døgnet

I alternativ B udføres der det samme som i alternativ A, dermed kombineres den naturlige ventilation med mekanisk udsugning, hvilket kaldes hybrid ventilation. Dette etableres med mekanisk udsugning i udeluftkanalerne i bryggerset, gæstetoilettet samt badeværelset med en luftstrøm på 26,4 l/s, hvilket overholder BR-18 § 443. Dette gøres for at nedbringe den relative luftfugtighed i huset, hvilket kan medføre en bedre luftkvalitet samt reducere mulighederne for fugtrelaterede bygningsskader. Der regnes med en driftstid (Fo) på 2% iht. Rettelsesblad til SBi-anvisning 213 (Build, Aalborg universitet, 2022) samt et specifikt elforbrug på 0,49 KJ/m^3. Tekniske data fremgår af bilag 8.

I alternativ B medregnes der ligeledes udskiftning af emhætten, da den eksisterende emhætte har en alder, hvor den er udskiftningsmoden. Desuden har den nye emhætte intensivfunktion, hvor os fra madlavning kan fjernes meget effektivt til fordel for luftkvaliteten i huset. Den nye emhætte beregnes ligeledes med en luftstrøm på 60 l/s, så den overholder ligeledes bygningsreglementets krav, som beskrevet i vejledningsteksten til BR-18 kap. 22. Der regnes med en driftstid (Fo) på 2% iht. Rettelsesblad til SBi-anvisning 213 (Build, Aalborg universitet, 2022). Det beregnes med et specifikt elforbrug for den nye emhætte på 0,62 KJ/m^3.

Ved at kombinere naturlig ventilation med mekanisk udsugning, er der de samme fordele og ulemper som i alternativ A. Derudover er der den fordel, at den fugtige luft hurtigere bliver fjernet i de rum, hvor der er mekanisk udsugning. Der er samtidig den ulempe, at der skal bruges mere el til drift af ventilatorerne samt de koster noget i indkøb, vedligehold og udskiftning.

I alternativ C udføres der åbningsarealer på mindst 100 cm^2 fra bad, gæstetoilettet samt fra køkkenet mod adgangsrummene, Derudover skabes der åbningsarealer under andre døre inde i huset, så det skal sikres, at luften kan fordele sig mellem de individuelle rum, selvom dørene er lukkede.

Der etableres mekanisk ventilation med varmegenvinding i hele huset, med udsugning i bryggerset, bad, gæstetoilet og køkken samt indblæsning i opholdsrummene jf. BR-18 § 443 stk. 2. Dette gøres for, at der kan opretholdes en god luftkvalitet i huset med en jævn tilførsel af udeluft.

Udelufttilførslen i hele huset er beregnet til 0,31 l/s m^2 opvarmet etageareal incl. forceret drift i 2% af brugstiden for udsugning i bryggers, bad, gæstetoilet og køkken, i alt 146 m^3/h. Da en del af luften alene udsuges gennem emhætte, uden at passere varmegenvinderen, kan det påvirke temperaturvirkningsgraden (η_{vgv}) i negativ retning. Ventilationskanalerne er placeret lige over spærfødderne omsvøbt af loftisolering. Der er regnet med en gennemsnitsdiameter på 125 mm for ventilationskanaler samt et varmetab på 0,18 W/mK, som er beregnet med regneprogrammet Roctec fra Rockwool. Der er regnet med en kanalføring, der maksimalt giver 100 pa i tryktab. Ventilationsaggregatet opstilles i loftrummet, der er regnet med et varmetab på 0,66 W/m^{2}K jf. DS 452_2013 6.3 (KL 3). Temperaturvirkningsgraden (η_{vgv}) for varmegenvindingen er fastsat til 92%. Det specifikke elforbrug (SEL) er fastsat til 0,8 kJ/m^3. Begge er fastsat ud fra producentens tekniske data. Tekniske data og beregninger fremgår af bilag 8. I dette projekt regnes der med, at ventilationsanlægget er indreguleret med et begrænset undertryk, så rumluft ikke trænger ud i konstruktionen gennem eventuelle utætheder (Hansen & et al., 2021). For at det kan dokumenteres, at husets konstruktioner er lufttætte, skal der udføres en tæthedsprøve. Der er i dette projekt regnet med et prøvningsresultat på 0,95 l/s m^2. Et undertryk i huset vil dog medvirke til øget indtrængning af radon. Dette behandles

nærmere i afsnit 9.4. Ud over det beskrevne for alternativ C, udskiftes emhætten også til en med de samme tekniske specifikationer som i alternativ B.

Etablering af mekanisk ventilation i huset kan have flere fordele f.eks.:

- Jævn ventilation over døgnet
- Lavere varmetab
- Mulighed for at etablere behandling af luften, eks. af- eller befugtning

Der er samtidig en række ulemper forbundet med mekanisk ventilation, f.eks.:

- Høje etableringsomkostninger
- Omkostninger til drift og vedligehold
- Øget indtrængning af radon

De forskellige ændringer i de tre alternativer giver ændringer i energiberegningerne i Be18. Af nedenstående tabel fremgår, hvilke ændringer der er foretaget i Be18. De værdier der fremgår i Be18, men ikke er i tabellen, er ikke ændret. Ventilationsaggregatet samt ventilationskanaler beregnes med temperaturfaktor b på 1,0 samt dimensionerende inde- og udetemperaturer på 20 °C, så temperaturdifferensen er 0 °C. På den måde indgår varmetab fra ventilationsaggregatet og –kanaler ved beregning af energibehovet, uden at påvirke opgørelsen af klimaskærmens dimensionerende varmetab jf. Sbi-anvisning 213 5.11. De værdier der fremgår i Be18, men ikke er i tabellen, er ikke ændret. Be18-beregningerne fremgår af bilag 8-A4, bilag 8-B4 samt bilag 8-C4.

Tabel 26. Ændringer i Be18 for trin 4

Alternativ A, *ingen ændring*					
Alternativ B					
Ventilation					
Hele boligen, naturlig ventilation, *ingen ændring*					
Følgende ændres/ tilføjes:	Areal (m²)	Fo (-)	qm (l/s m²)	SEL (kJ/m³)	qm,s (l/s m²)
Emhætte	1	0,02	60,0	0,63	60,0
Udsugningsanlæg, bryggers	1	0,02	26,4	0,49	26,4
Udsugningsanlæg, bad	1	0,02	26,4	0,49	26,4
Udsugningsanlæg, toilet	1	0,02	26,4	0,49	26,4
Alternativ C					
Ydervægge, tage og gulve	Areal (m²)	U (W/m²K)			
57.1 Ventilationsagregat	2,7	0,66			
Fundamenter og samlinger ved vinduer	l (m)	Tab (W/mK)			
57.2 Ventilationskanaler	35	0,18			
Ventilation Hele boligen, naturlig ventilation, *slettes*					
Emhætte, *samme indtastning som i alternativ B*					
Bal. Mekanisk ventilation, Hele boligen *(ubenævnte celler har værdien 0)*:					

Areal (m²)	Fo, -	qm (l/s m²)	n vgv (-)	ti (°C)	qn (l/s m²)	SEL (kJ/m³)	qm,s (l/s m²)	qn,s (l/s m²)
132	1	0,31	0,92	18	0,097	0,8	0,31	1,1

Efter trin 3, som var hulmursisolering, var husets samlede energibehov 92,9 kWh/m² år. Med en differentiering af, hvad der udføres i trin 4 for alternativ A, B og C, er det samlede energibehov forskelligt for de tre alternativer. For alternativ A er der ingen ændring i det samlede energibehov siden trin 3. For alternativ B er der en stigning på 1,2 kWh/m² år i forhold til trin 3, som stammer fra el til drift af mekanisk udsugning samt fra en lille stigning i varmebehovet. For alternativ C er der et fald på 8,2 kWh/m² år siden trin 3, som stammer fra et fald i varmebehovet. Her er der indregnet en stigning i elbehov til drift af mekanisk ventilation. I Tabel 27 er de overordnede resultater vedr. energibehov efter trin 4 opsummeret. Det er værd at bemærke, at det samlede energibehov for alternativ C er nu under den samlede energiramme for renoveringsklasse 2, samt at der er sket et fald i overtemperatur i rum for både alternativ B og C, som var 4,1 kWh/m² år efter trin 3. Dette skyldes, at der er en forøgelse af ventilationen i huset.

Tabel 27. Energi-rammer og behov efter trin 4

Energi-rammer og behov			**kWh/m² år**	
Renoveringsklasse 1, samlet energiramme			65,0	
Renoveringsklasse 2, samlet energiramme			86,7	
	Eksist. forhold	**Alt. A Efter trin 4**	**Alt. B Efter trin 4**	**Alt. C Efter trin 4**
Samlet energibehov	146,6	92,9	94,1	84,7
Bidrag til energibehov				
Varme	164,8	98,8	100,2	86,3
El til bygningsdrift	2,7	2,5	2,6	4,6
Overtemperatur i rum	1,4	4,1	4,0	2,6

Tabel 28 nedenfor viser, at det dimensionerende transmissionstab ikke har ændret sig for alternativ A siden trin 3. Det er fordi, at der ikke er sket nogle beregningstekniske ændringer i dette alternativ. Derfor er det kun summen af de forskellige dimensionerende transmissionstab, der er angivet for alternativ A.

I alternativ B er der sket en lille stigning på 53 W siden husets eksisterende forhold i ventilationstab uden varmegenvinding *(om vinteren)*. Det er fordi der er tilføjet mekanisk udsugning, hvilket giver en smule større luftskifte. Det dimensionerende transmissionstab fra øvrige bygningsdele er ikke ændret, derfor fremgår de ikke af tabellen.

I alternativ C er der opgjort dimensionerende transmissionstab med og uden varmegenvinding. Uden varmegenvinding er det ca. 490 - 540 W større end alternativ A og B, hvilket skyldes at udeluftstrømmen [l/s m^2] er en smule større end ved naturlig ventilation. Derimod er ventilationstabet med varmegenvinding faldet til 673W, hvilket skyldes at varmen i luften, der bliver suget ud, bliver genanvendt til at varme indblæsningsluften op. Siden husets eksisterende forhold er ventilationstabet for alternativ C steget med 541 W (ca. 34%) uden varmegenvinding, og faldet med 911 W (ca. 58%) med varmegenvinding. Det dimensionerende transmissionstab fra øvrige bygningsdele i alternativ C er ikke ændret, derfor fremgår de ligeledes ikke af tabellen.

Tabel 28. Dimensionerende transmissionstab for vinduer og yderdøre efter trin 4

Dimensionerende transmissionstab	**Eksist. forhold**		**Efter trin 4**	
	W	**W/m^2**	**W**	**W/m^2**
Alternativ A				
I alt	**8109**	**61,4**	**4847**	**36,7**
Alternativ B				
Vent.tab uden VGV *(om vinteren)*	1584	12,0	1637	12,4
I alt	**8109**	**61,4**	**4900**	**37,1**
Alternativ C				
Vent.tab uden VGV *(om vinteren)*	1584	12,0	2125	16,1
I alt uden VGV *(om vinteren)*	**8109**	**61,4**	**5388**	**40,8**
Vent.tab med VGV *(om vinteren)*	1584	12,0	673	5,1
I alt med VGV *(om vinteren)*	**8109**	**61,4**	**3936**	**29,8**

I alternativ A er der ikke sket nogle ændringer i varmetilskud siden trin 3. I alternativ B og C er der kun sket en meget lille ændring i det variable varmetilskud fra rør, hvor det afhænger af opvarmningsperiodens længde, som påvirker varmebalancen i huset.

Efter trin 3 var det ækvivalente elbehov til at fjerne overtemperaturerne med et standard køleanlæg på 4,1 kWh/m^2 år. Det er uændret for alternativ A efter trin 4. For alternativ B er det faldet 0,1 kWh/m^2 år, hvilket fremgår af Tabel 27. Dette fald giver dog intet fald i antal timer over 27 °C og 28 °C for det mest solbelastede rum. I alternativ C er timeantallet over 27 °C faldet med 1 til 36 og timeantallet over 28 °C faldet med 2 til 7, hvilket fremgår af Tabel 29 nedenfor. Dette fald giver sig udslag i et fald på 1,5 kWh/m^2 år til 2,6 kWh/m^2 år for det ækvivalente elbehov til at fjerne overtemperaturerne med et standard køleanlæg.

Tabel 29. Sommerkomfort, mest solbelastede rum, opholdsstuen efter trin 4

Sommerkomfort, mest solbelastede rum, opholdsstuen. Antal timer over	**Eksist. forhold**		**Efter trin 4**	
	27 °C	**28 °C**	**27 °C**	**28 °C**
Alternativ A	56	18	37	9
Alternativ B	56	18	37	9
Alternativ C	56	18	36	7

De økonomiske omkostninger i forbindelse med udførslen af trin 4, gældende for alternativ A, B og C, er beskrevet i afsnit 10.1. Husets energitekniske tilstand i forhold til at blive bragt i renoveringsklasse 1 og 2 er opsummeret i tabellen nedenfor.

Tabel 30. Krav til opfyldelse jf. BR-18 §§ 280-281 efter trin 4

Krav der skal opfyldes for at opnå renoveringsklasser jf. BR-18 §§ 280-281	**Renoverings-klasse 1**			**Renoverings-klasse 2**		
Samlet energiramme [kWh/m² år]	*65,0*			*86,7*		
Alternativ	**A**	**B**	**C**	**A**	**B**	**C**
Overholdelse af energiramme	✗	✗	✗	✗	✗	✓
Reduktion med mindst 30,0 kWh/m² pr. år. af behovet for tilført energi	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Eftervisningen iht. SBi-anvisning 213 Bygningers energibehov med Be18	✓	✓	✓	✓	✓	✓
En andel af vedvarende energi i den samlede energiforsyning til huset som er fjernvarme	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Overholdelse af BR-18 §§ 382-384 vedr. belysning	*Ej aktuel*			*Ej aktuel*		
Overholdelse af BR-18 § 386 vedr. termisk indeklima	✓	✓	✓	*Ej aktuel*		
Overholdelse af BR-18 §§ 443-449 vedr. ventilation	✓	✓	✓	*Ej aktuel*		

7.5 Trin 5, Varmefordelingsanlæg

I afsnit 5.2 er husets eksisterende varmefordelingsanlæg beskrevet som et indirekte to-strengsystem med varmeveksler, der er koblet på fjernvarme, radiatorer, flertrins cirkulationspumpe med manuel indstilling og ekspansionsbeholder. I afsnit 6 viser Tabel 5, at der i huset er et varmetilskud på 2,20 MWh fra rør og VVB konstant drift samt 2,45 MWh fra variable varmetilskud ved husets eksisterende forhold. Disse to varmetilskud udgør ca. 31% af det samlede varmetilskud i huset ved eksisterende forhold. Derudover viser de underliggende data, at der er et elforbrug på 2,3 kWh/m^2 år samt et varmetab fra installationer på 42,1 kWh/m^2 år ved husets eksisterende forhold. Disse resultater gør, at trin 5 omhandler optimering af varmefordelingsanlægget. Da varmefordelingsanlægget er ens i de tre alternativer, er tiltaget ens for de tre alternativer. Dokumenter vedr. de nye tekniske installationer fremgår af bilag 9.

Som beskrevet i Tabel 8 indeholder trin 5 følgende:

- Varmefordelingsanlæg laves om fra indirekte fjernvarme til direkte fjernvarme, hvilket medfører, at cirkulationspumpen udskiftes og ekspansionsbeholderen udgår.
- Der etableres vejrkompenseringsanlæg og blandesløjfe på varme-fordelingsanlægget
- Den eksisterende varmeveksler udskiftes til en pre-isoleret model, som kun anvendes til opvarmning af brugsvand
- Der etableres vejrkompenseringsanlæg

Optimeringen af varmefordelingsanlægget kan have flere effekter som eksempelvis:

- En bedre årsafkøling end for indirekte anlæg, svarende til ca. 5 °C. Dette har dog ingen energimæssig betydning, men kun en økonomisk betydning i forbindelse med mindre strafgebyr i forbindelse med god afkøling af returvandet.
- Udskiftning af en ældre veksler til en ny vil minimere vedligeholdelsesudgifterne samt forbedre afkølingen
- Energieffektivitet i form af lavere elforbrug til cirkulationspumpning (Videncenter for Energibesparelser i Bygninger, 2022)

Det kan dog være nødvendigt at udskifte nogle komponenter (radiatorer, ventiler m.m.) i forbindelse med konverteringen til direkte fjernvarme hvis de ikke kan holde til det højere tryk i anlægget.

Da varmefordelingsrørene er placeret imellem gulvstrøer over betondækket, og under gulvbelægningen, øges isoleringstykkelsen på rørene ikke.

I forbindelse med udskiftning af tekniske installationer vedr. varmefordelingsanlægget og brugsvandsanlægge skal de overholde BR-18 kap. 19 og 2, som omhandler nogle generelle krav samt krav til energiforbrug, kontrol samt drift og vedligehold.

I Be18 er der sket ændringer for returløbstemperaturen, udetemperaturkompensering, sommerstop, pumpeskema samt fjernvarmeveksler. De ændringer, der er foretaget, fremgår af Tabel 31 nedenfor. Værdier der fremgår i Be18, men ikke fremgår af Tabel 31 er ikke ændret. Be18-beregningerne fremgår af bilag 9-A5, bilag 9-B5 samt bilag 9-C5.

Tabel 31. Ændringer i Be18 for tekniske installationer i trin 5

Varmefordelingsanlæg	**Eksist. forhold**		**Trin 5**	
	Returløbstemperatur, °C		Returløbstemperatur, °C	
Radiator retur	40		35	
Varmerør	Ude-komp.	Afb. sommer	Ude-komp.	Afb. sommer
Radiator, frem, fordelingsrør	N	N	J	J
Radiator, retur, fordelingsrør	N	N	J	J
Radiator, frem, stikrør	N	J	J	J
Radiator, retur, stikrør	N	J	J	J
Pumpeskema	Type (A,V,T,K)	Antal	Pnom (W)	Fp (-)
Eksisterende pumpe Cirkulationspumpe for radiatorer	V	1	60	0,8
Ny pumpe Grundfoss ALPHA2 15-40 130	T	1	18	0,3
Fjernvarmeveksler	Nominel effekt, kW		Varmetab fra veksler, W/K	
Eksisterende fjernvarmeveksler	27		8	
Ny fjernvarmeveksler	32,2		0,11	

Efter trin 5 er der for de tre alternativer sket et fald i det samlede energibehov på ca. 18,4 kWh/m^2 år siden trin 4. Det betyder, at den samlede energiramme for renoveringsklasse 2 er overholdt for de tre alternativer A, B og C. Bidraget til energibehovet, som stammer fra varme, er for de tre alternativer gennemsnitligt faldet med ca. 14,7 kWh/m^2 år. Dette fald stammer fra et reduceret fald i varmetab fra installationer. Samtidigt er der sket et fald i el til bygningsdrift, da cirkulationspumpen er blevet skiftet til en mere effektiv model. Faldet i el til bygningsdrift er gennemsnitligt ca. 1,9 kWh/m^2 år for de tre alternativer. Det ækvivalente elbehov til at fjerne overtemperaturerne med et standard køleanlæg, er ligeledes faldet med gennemsnitligt 2,4 kWh/m^2 år for de tre alternativer, hvilket skyldes, at der ikke er så stort varmetab fra installationer, som skaber varmetilskud i huset. I Tabel 32 er de overordnede resultater vedr. energibehov efter trin 5 opsummeret.

Tabel 32. Energi-rammer og behov efter trin 5

Energi-rammer og behov			**kWh/m^2 år**	
Renoveringsklasse 1, samlet energiramme			65,0	
Renoveringsklasse 2, samlet energiramme			86,7	
	Eksist. forhold	**Alt. A Efter trin 5**	**Alt. B Efter trin 5**	**Alt. C Efter trin 5**
Samlet energibehov	146,6	74,5	75,7	66,2
Bidrag til energibehov				
Varme	164,8	84,2	85,5	71,6
El til bygningsdrift	2,7	0,6	0,7	2,8
Overtemperatur i rum	1,4	1,7	1,7	0,0

Det er gældende for hvert af de tre alternativer, at der ikke sker ændringer i det dimensionerende transmissionstab, da der ikke er sket ændringer i husets konstruktioner eller ventilationsforhold.

I de tre alternativer er der sket den samme ændring i varmetilskud fra rør og VVB samt fra variable varmetilskud, hvilket er opsummeret i Tabel 33 nedenfor. Variable varmetilskud er fra rør, hvor det afhænger af opvarmningsperiodens længde, som påvirker varmebalancen i huset. Det er en direkte konsekvens af at varmefordelingsanlægget er blevet opgraderet. Disse fald i varmetilskud, er grunden til faldet i elbehovet vedr. overtemperatur i rum, som fremgår af Tabel 32.

Tabel 33. Varmetilskud pr. år efter trin 5

Varmetilskud pr. år	**Eksist. forhold**		**Efter trin 5**	
	MWh	**kWh/ m²**	**MWh**	**kWh/m²**
Alternativ A				
Fra rør og VVB konst.	2,20	16,7	0,00	0,0
Variable varmetilskud fra rør	2,45	18,6	1,35	10,2
I alt	**15,01**	**113,7**	**10,32**	**78,1**
Alternativ B				
Fra rør og VVB konst.	2,20	16,7	0,00	0,0
Variable varmetilskud fra rør	2,45	18,6	1,35	10,2
I alt	**15,01**	**113,7**	**10,33**	**78,3**
Alternativ C				
Fra rør og VVB konst.	2,20	16,7	0,00	0,0
Variable varmetilskud fra rør	2,45	18,6	1,35	10,2
I alt	**15,01**	**113,7**	**10,32**	**78,2**

Antallet af timer over 27 °C og 28 °C, som angiver sommerkomforten for det mest solbelastede rum, opholdsstuen, er ikke ændret siden trin 4. Derfor er timeantallet for alternativ A og B 27 °C og 28 °C 37 og 9, imens det for alternativ C er 36 og 7.

De økonomiske omkostninger i forbindelse med udførslen af trin 5, gældende for alternativ A, B og C, er beskrevet i afsnit 10.1. Husets energitekniske tilstand i forhold til at blive bragt i renoveringsklasse 1 og 2 er opsummeret i tabellen nedenfor.

Tabel 34. Krav til opfyldelse jf. BR-18 §§ 280-281 efter trin 5

Krav der skal opfyldes for at opnå renoveringsklasser jf. BR-18 §§ 280-281	**Renoverings-klasse 1**			**Renoverings-klasse 2**		
Samlet energiramme [kWh/m² år]	*65,0*			*86,7*		
Alternativ	**A**	**B**	**C**	**A**	**B**	**C**
Overholdelse af energiramme	✗	✗	✗	✓	✓	✓
Reduktion med mindst 30,0 kWh/m² pr. år. af behovet for tilført energi	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Eftervisningen iht. SBi-anvisning 213 Bygningers energibehov med Be18	✓	✓	✓	✓	✓	✓
En andel af vedvarende energi i den samlede energiforsyning til huset som er fjernvarme	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Overholdelse af BR-18 §§ 382-384 vedr. belysning	*Ej aktuel*			*Ej aktuel*		
Overholdelse af BR-18 § 386 vedr. termisk indeklima	✓	✓	✓	*Ej aktuel*		
Overholdelse af BR-18 §§ 443-449 vedr. ventilation	✓	✓	✓	*Ej aktuel*		

7.6 Trin 6, Ind- og udvendig efterisolering samt solceller

Af Tabel 34 fremgår det, at trin 5 bragte huset i renoveringsklasse 2 for alternativerne A og B. Huset var allerede bragt dertil efter trin 4 med alternativ C, som indeholder mekanisk ventilation. Trin 6 er det sidste trin i dette projekt, som skal bringe huset i renoveringsklasse 1. Som Figur 5 viser er der i dette trin tre forskellige muligheder for at afslutte alternativ A, B og C. De tre muligheder har hver deres fordele og ulemper. Mulighederne er følgende:

- Etablering af indvendig efterisolering, *eller*
- Etablering af udvendig efterisolering, *eller*
- Etablering af solcelleanlæg

Nedenfor beskrives de tre forskellige afslutningsmuligheder mere detaljeret, samt hvilke resultater, de giver.

7.6.1 Trin 6, Indvendig efterisolering

I denne afslutningsmulighed er der regnet med indvendig efterisolering af ydervæggene med 55 mm trykfast plademateriale af super XPS med en lav varmeledningsevne (λ=0,027), hvilket har den samme modstand mod varmeledning som et isoleret (λ=0,037) træskelet med en tykkelse på ca. 87 mm. På pladerne er der limet gipsplader med spartelkanter, som er klar til malerbehandling. Indvendig efterisolering af ydervæggene har nogle fordele, f.eks.:

- Reduktion af varmetabet
- Det kan udføres etapevis, rum for rum
- Det ændrer ikke på husets ydre udtryk

Indvendig efterisolering har også en række ulemper, f.eks.:

- Det tager af det indvendige gulvareal
- Der kan skabes kuldebroer ved skillevægge
- Det skaber mange følgearbejder, f.eks. skal radiatorer og skabe flyttes
- Det kan reducere lysindfaldet
- Det kan skabe bygningsfysiske udfordringer, som behandles i afsnit 9
- Beboerne skal flytte ud af rummene, mens arbejdet pågår

I forbindelse med projektering og udførsel af indvendig efterisolering skal BR-18 §§ 334 – 335 som omhandler fugt, kondens, skimmelvækst, skade på bygninger og personers sundhed overholdes.

Efter trin 3, hvor ydervæggen blev efterisoleret i hulrummet, var ydervæggens U-værdi 0,30 W/m^{2}K. Med indvendig efterisolering er ydervæggens U-værdi 0,22 W/m^{2}K. Derudover er der brystningsvægge og hjørnesamlinger, hvor varmetabet er reduceret. Energiteknisk dokumentation samt U-værdiberegninger fremgår af bilag 10. Af Tabel 35 nedenfor fremgår hvilke ændringer, der er foretaget i Be18 for hver af de tre alternativer. De værdier der fremgår i Be18, men ikke er i tabellen, er ikke ændret. Be18-beregningerne fremgår af bilag 10-A6-I, bilag 10-B6-I samt bilag 10-C6-I. Det bør bemærkes, at ændringen af varmekapaciteten i huset ikke er ændret i beregningerne. En ændring af dette ville medføre et øget energibehov, da XPS har en mindre termisk massen end porebeton.

Tabel 35. Ændringer i Be18 for i trin 6 med indvendig efterisolering

Ydervægge, tage og gulve	**Efter trin 3**		**Efter trin 6 med indv. Efteriso.**	
	Areal (m²)	U (W/m²K)	Areal (m²)	U (W/m²K)
21.1 Ydervæg 300 mm	75,41	0,30	75,41	0,22
21.1 Ydervæg 300 mm bag radiator	2,74	0,30	2,74	0,22
21.2 Ydervæg (brystning) 225 mm	2,06	0,60	2,06	0,31
21.2 Ydervæg (brystning) 225 mm (bag radiator)	2,86	0,60	2,86	0,31
21.3 Ydervæg (søjle) 300 mm	1,23	0,51	1,23	0,29
Fundamenter og samlinger ved vinduer	l (m)	Tab (W/mK)	l (m)	Tab (W/mK)
21.3 Ydervæg udadgående hjørner 350 mm	10,3	-0,11	10,3	-0,09

Efter trin 5 var det samlede energibehov for alternativ A og B ca. 10 kWh/m^2 år højere end den samlede energiramme for renoveringsklasse 1 på 65,0 kWh/m^2 år. Alternativ C var kun 1,2 kWh/m^2 år over. I trin 2 og 3, hvor tagkonstruktionen og ydervæggene blev efterisoleret, faldt varmebehovet, men det ækvivalente elbehov vedr. overtemperatur i rum steg. Det samme gør sig gældende ved indvendig efterisolering af ydervæggene. Siden trin 5 gør følgende sig gældende for de tre alternativer: det samlede energibehov for de tre alternativer er faldet med 4,3 – 4,7 kWh/m^2 år. Varmebehovet er faldet med 5,3 – 5,5 kWh/m^2 år. Der er samtidig sket en stigning på 0,0 – 0,3 kWh/m^2 år ækvivalente elbehov vedr. overtemperatur i rum. Af Tabel 36 er de overordnede resultater vedr. energibehov efter trin 6 med indvendig efterisolering opsummeret. Her fremgår det, at den indvendige efterisolering ikke er nok til at bringe huset i renoveringsklasse 1 med alternativ A og B. Derimod er det nok til at bringe huset i renoveringsklasse 1 i alternativ C.

Tabel 36. Energi-rammer og behov efter trin 6 med indvendig efterisolering

Energi-rammer og behov			**kWh/m^2 år**	
Renoveringsklasse 1, samlet energiramme			65,0	
Renoveringsklasse 2, samlet energiramme			86,7	
	Eksist. forhold	**Alt. A**	**Alt. B**	**Alt. C**
		Efter tin 6 med indv. efteriso.		
Samlet energibehov	146,6	70,2	71,4	61,5
Bidrag til energibehov				
Varme	164,8	78,8	80,2	66,1
El til bygningsdrift	2,7	0,6	0,7	2,8
Overtemperatur i rum	1,4	2,0	1,9	0,0

Fordi alternativ A og B allerede overholder renoveringsklasse 2, men ikke kan overholde renoveringsklasse 1 med indvendig efterisolering, behandles de ikke yderligere med denne afslutningsmulighed.

Den indvendige efterisolering af ydervæggen har reduceret det dimensionerende transmissionstab gennem ydervægge, tage og gulve med 286 W fra 1966 W i trin 5. Der er dog sket en stigning på 7 W i det dimensionerende transmissionstab fra 793 W gennem linjetab fra fundamenter og samlinger ved vinduer siden trin 5. Denne stigning stammer fra et fald i fradrag fra udadgående hjørner ved ydervæggen, hvilket fremgår af Tabel 35. Det dimensionerende transmissionstab er opsummeret i Tabel 37 nedenfor. Da der ikke er sket ændringer i transmissionstab gennem vinduer og yderdøre samt ventilationstab fremgår ikke af tabellen.

Tabel 37. Dimensionerende transmissionstab for efter trin 6 med indvendig efterisolering

Dimensionerende transmissionstab	**Eksist. Forhold**		**Efter trin 6-I**	
	W	**W/m²**	**W**	**W/m²**
Alternativ C				
Ydervægge, tage og gulve	3604	27,3	1680	12,7
Fund. Og samlinger ved vinduer	669	5,1	599	4,5
I alt uden VGV *(om vinteren)*	**8109**	**61,4**	**5388**	**40,8**
Ydervægge, tage og gulve	3604	27,3	1680	12,7
Fund. Og samlinger ved vinduer	669	5,1	599	4,5
I alt med VGV *(om vinteren)*	**8109**	**61,4**	**3936**	**29,8**

Den indvendige efterisolering betyder, at huset ikke taber varmen så hurtigt. Det betyder, at der er sket en reduktion i varmeperiodens længde, hvilket giver et fald i det variable varmetilskud fra rør på 0,02 MWh pr. år fra 1,35 MWh pr. år.

Efter trin 5 var timeantallet over 27 °C og 28 °C i opholdsstuen for alternativ C 36 og 7 timer. Men fordi ydervæggene er blevet efterisoleret holder huset bedre på varmen. Det viste sig også i Tabel 36 som en stigning på 0,0 – 0,3 kWh/m² år ækvivalente elbehov vedr. overtemperatur i rum. Efter den indvendige efterisolering er der sket en stigning i timeantallet over 27 °C og 28 °C for opholdsstuen på 1 og 2 timer, så det nu er 37 og 9 timer over 27 °C og 28 °C i opholdsstuen.

Tabel 38. Sommerkomfort, mest solbelastede rum, efter trin 6 med indvendig efterisolering

Sommerkomfort, mest solbelastede rum, opholdsstuen. Antal timer over	**Eksist. forhold**		**Efter trin 4**	
	27 °C	**28 °C**	**27 °C**	**28 °C**
Alternativ C	56	18	37	9

De økonomiske omkostninger i forbindelse med udførslen af indvendig efterisolering i trin 6 er for alternativ C er beskrevet i afsnit 10.1. Husets energitekniske tilstand i forhold til at blive bragt i renoveringsklasse 1 og 2 er opsummeret i tabellen nedenfor.

Tabel 39. Krav til opfyldelse jf. BR-18 §§ 280-281 efter trin 6 med indvendig efterisolering

Krav der skal opfyldes for at opnå renoveringsklasser jf. BR-18 §§ 280-281	**Renoverings-klasse 1**			**Renoverings-klasse 2**		
Samlet energiramme [kWh/m² år]	*65,0*			*86,7*		
Alternativ	**A**	**B**	**C**	**A**	**B**	**C**
Overholdelse af energiramme	✗	✗	✓	✓	✓	✓
Reduktion med mindst 30,0 kWh/m² pr. år. af behovet for tilført energi	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Eftervisningen iht. SBi-anvisning 213 Bygningers energibehov med Be18	✓	✓	✓	✓	✓	✓
En andel af vedvarende energi i den samlede energiforsyning til huset som er fjernvarme	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Overholdelse af BR-18 §§ 382-384 vedr. belysning	*Ej aktuel*			*Ej aktuel*		
Overholdelse af BR-18 § 386 vedr. termisk indeklima	✓	✓	✓	*Ej aktuel*		
Overholdelse af BR-18 §§ 443-449 vedr. ventilation	✓	✓	✓	*Ej aktuel*		

7.6.2 Trin 6, Udvendig efterisolering

Denne afslutningsmulighed indeholder udvendig efterisolering af huset med 100 mm hårde isoleringsbatts (λ= 0,037), som behandles med puds og maling. Efterisoleringen omfatter også isolering af husets sokkel samt remmen, der bærer tagkonstruktionen. En udvendig efterisolering har en række fordele som f.eks.:

- Hele huset isoleres af et ubrudt lag
- Det tager ikke plads indvendigt
- Det er ofte en mere fugtteknisk sikker løsning
- Det kan gennemføres uden at beboerne flytter ud af rummene

Der er ligeledes en række ulemper forbundet med udvendig efterisolering, f.eks.:

- Facaden kan være sårbar over for stød
- Vinduer og yderdøre skal rykkes ud i facaden. Hvis dette ikke sker, vil solindfaldet reduceres med et øget energibehov til følge.

I forbindelse med projektering og udførsel af udvendig efterisolering skal BR-18 §§ 334 – 335, som omhandler fugt, kondens, skimmelvækst, skade på bygninger og personers sundhed overholdes. Iht. BR-18 § 455 stk. 3 medregnes udvendig efterisolering op til 25 cm ikke til etagearealet. Derfor skal BBR-oplysninger vedr. bruttoetageareal ikke rettes i forbindelse med den udvendige efterisolering.

Ydervæggens U-værdi blev i trin 3 i forbindelse med hulmursisolering forbedret til 0,30 W/m²K. Med 100 mm udvendig efterisolering bliver U-værdien forbedret til 0,21 W/m²K. Derudover bliver et antal andre flade- og linjetab også forbedret. Energiteknisk dokumentation vedr. den udvendige efterisolering samt U-værdiberegninger fremgår af

bilag 10. Af Tabel 40 nedenfor fremgår hvilke ændringer, der er foretaget i Be18 for hver af de tre alternativer. De værdier der fremgår i Be18, men ikke er i tabellen, er ikke ændret. Be18-beregningerne vedr. udvendig efterisolering fremgår af bilag 10-A6-U, bilag 10-B6-U samt bilag 10-C6-U. Enkelte arealer og linjetabslængder er blevet større, fordi måltagning er til udvendig side for ydervægge og fundamenter jf. DS 418 kap. 3.

Tabel 40. Ændringer i Be18 for i trin 6 med udvendig efterisolering

Ydervægge, tage og gulve	**Efter trin 3**		**Efter trin 6 med udv. Efteriso.**	
	Areal (m²)	U (W/m²K)	Areal (m²)	U (W/m²K)
21.1 Ydervæg 300 mm	75,41	0,30	76,98	0,21
21.1 Ydervæg 300 mm bag radiator	2,74	0,30	2,74	0,21
21.2 Ydervæg (brystning) 225 mm	2,06	0,60	2,06	0,28
21.2 Ydervæg (brystning) 225 mm (bag radiator)	2,86	0,60	2,86	0,28
21.3 Ydervæg (søjle) 300 mm	1,23	0,51	1,23	0,26
21.4 Ydervæg (rem) 260 mm	14,65	0,41	14,94	0,24
Fundamenter og samlinger ved vinduer	l (m)	Tab (W/mK)	l (m)	Tab (W/mK)
12.1 Fundament ved strøgulv	39,3	0,29	40,2	0,16
12.2 Fundament ved klaplag	5,6	0,77	5,6	0,30
12.3 Fundament ved døre/ strøgulv	2,4	0,89	2,4	0,44
12.4 Fundament ved døre/ strøgulv	2,6	0,89	2,6	0,44
21.3 Ydervæg udadg. Hjørner. 350 mm	10,3	-0,11	10,3	-0,08
25.1 Bjælke over stuevindue	4,5	0,8	4,5	0,45
27.2 Væg-tag samling	49,9	-0,09	50,8	-0,07
38.1 Fuger om vind. og døre ved murv.	71,2	0,005	71,2	0,00
38.2-U Fuger under døre ved fund.	5,0	0,005	5,0	0,00

Efter trin 5, hvor varmefordelingsanlægget blev optimeret, var det samlede energibehov for alternativ A og B ca. 10 kWh/m² år højere end den samlede energiramme for renoveringsklasse 1 på 65,0 kWh/m² år. Alternativ C var kun 1,2 kWh/m² år over. Ved udvendig efterisolering gør det sig også gældende, at varmebehovet er faldet, men det ækvivalente elbehov vedr. overtemperatur i rum er steget. Siden trin 5 gør følgende sig gældende for de tre alternativer: det samlede energibehov for de tre alternativer faldet med 11,8 – 12,6 kWh/m² år. Varmebehovet er faldet med 14,7 – 14,8 kWh/m² år. Elbehovet til bygningsdrift er uændret. Der er samtidig sket en stigning på 0,0 – 0,8 kWh/m² år ækvivalente elbehov vedr. overtemperatur i rum. Af Tabel 41 er de overordnede resultater vedr. energibehov efter trin 6 med udvendig efterisolering opsummeret. Her fremgår det, at udvendige efterisolering er nok til at bringe huset i renoveringsklasse 1 med alternativ A, B og C.

Tabel 41. Energi-rammer og behov efter trin 6 med udvendig efterisolering

Energi-rammer og behov			**kWh/m² år**	
Renoveringsklasse 1, samlet energiramme			65,0	
Renoveringsklasse 2, samlet energiramme			86,7	
	Eksist. forhold	**Alt. A**	**Alt. B**	**Alt. C**
		Efter tin 6 med indv. efteriso.		
Samlet energibehov	146,6	62,7	63,9	53,6
Bidrag til energibehov				
Varme	164,8	69,5	70,8	56,8
El til bygningsdrift	2,7	0,6	0,7	2,8
Overtemperatur i rum	1,4	2,5	2,4	0,0

På grund af den udvendige efterisolering er det samlede dimensionerende transmissionstab for hele huset faldet. Der er siden trin 5 sket en reduktion på 371 W i transmissionstab gennem ydervægge, tage og gulve. Ved linjetab er der sket en reduktion på 338 W siden trin 5. Da der er sket de samme ændringer i de tre alternativer, er de kun noteret ved alternativ A, men de samlede dimensionerende transmissionstab er vist for de tre alternativer i Tabel 42 nedenfor. Da der ikke er sket ændringer i transmissionstab gennem vinduer og yderdøre samt ventilationstab fremgår ikke af tabellen.

Tabel 42. Dimensionerende transmissionstab for efter trin 6 med udvendig efterisolering

Dimensionerende transmissionstab	**Eksist. forhold**		**Efter trin 6-U**	
	W	**W/m²**	**W**	**W/m²**
Alternativ A				
Ydervægge, tage og gulve	3604	27,3	1595	12,1
Fund. og samlinger ved vinduer	669	5,1	255	1,9
I alt uden VGV *(om vinteren)*	**8109**	**61,4**	**4139**	**31,4**
Alternativ B				
I alt uden VGV *(om vinteren)*	**8109**	**61,4**	**4192**	**31,8**
Alternativ C				
I alt uden VGV *(om vinteren)*	**8109**	**61,4**	**4679**	**35,4**
I alt med VGV *(om vinteren)*	**8109**	**61,4**	**3227**	**24,4**

Faldet i varmebehovet, som beskrevet i Tabel 41, betyder samtidigt at opvarmningsperioden er blevet forkortet, hvilket har givet sig udslag i det variable varmetilskud fra rør, som påvirker husets varmebalance. For alternativ A og B er der siden trin 5 sket et fald på 0,02 MWh pr. år, og for alternativ C er faldet på 0,05 MWh pr. år.

Efter trin 5 var antallet af timer over 27 °C og 28 °C, som angiver sommerkomforten for det mest solbelastede rum for alternativ A og B 37 og 9, mens det for alternativ C var 36 og 7. Med udvendig efterisolering er der sket en stigning i timeantallet over 27 °C og 28 °C med 11 og 4 timer for alternativ A og B, hvor stigningen for alternativ C er 5 og 4 timer.

Tabel 43. Sommerkomfort, mest solbelastede rum, efter trin 6 med indvendig efterisolering

Sommerkomfort, mest solbelastede rum, opholdsstuen. Antal timer over	**Eksist. forhold**		**Efter trin 4**	
	27 °C	**28 °C**	**27 °C**	**28 °C**
Alternativ A	56	18	48	13
Alternativ B	56	18	48	13
Alternativ C	56	18	41	11

De økonomiske omkostninger i forbindelse med udførslen af udvendig efterisolering i trin 6 er for alternativ A, B og C er beskrevet i afsnit 10.1. Husets energitekniske tilstand i forhold til at blive bragt i renoveringsklasse 1 og 2 er opsummeret i tabellen nedenfor.

Tabel 44. Krav til opfyldelse jf. BR-18 §§ 280-281 efter trin 6 med indvendig efterisolering

Krav der skal opfyldes for at opnå renoveringsklasser jf. BR-18 §§ 280-281	**Renoverings-klasse 1**			**Renoverings-klasse 2**		
Samlet energiramme [kWh/m² år]	*65,0*			*86,7*		
Alternativ	**A**	**B**	**C**	**A**	**B**	**C**
Overholdelse af energiramme	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Reduktion med mindst 30,0 kWh/m² pr. år. af behovet for tilført energi	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Eftervisningen iht. SBi-anvisning 213 Bygningers energibehov med Be18	✓	✓	✓	✓	✓	✓
En andel af vedvarende energi i den samlede energiforsyning til huset som er fjernvarme	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Overholdelse af BR-18 §§ 382-384 vedr. belysning	*Ej aktuel*			*Ej aktuel*		
Overholdelse af BR-18 § 386 vedr. termisk indeklima	✓	✓	✓	*Ej aktuel*		
Overholdelse af BR-18 §§ 443-449 vedr. ventilation	✓	✓	✓	*Ej aktuel*		

7.6.3 Trin 6, Solceller

Den sidste afslutningsmulighed er at etablere et solcelleanlæg uden batteri. Det kan være med til at dække elbehovet vedr. el til bygningsdrift samt en del af beboernes elbehov. Da anlægget er uden batteri, kan strømmen ikke lageres til f.eks. aftentimerne, men skal anvendes, når den bliver produceret. Det er vigtigt at tage højde for, om husets konstruktioner kan bære solcellepanelerne, og om det er tilladt ifølge lokalplanen. Anlægget består af 3 stk. monokrystallinske solcellepaneler med et samlet areal på 4,95 m^2, derudover en inverter og kabler. Anlægget har en peak power på 0,182 kW/m^2 og en systemvirkningsgrad på 0,88. Solcellepanelerne placeres på den vestvendte tagflade med ca. 27 graders hældning, hvor der ingen skyggende forhold er. De tekniske data for solcelleanlægget fremgår af bilag 10. Det bør bemærkes, at solcelleanlægget i dette projekt kun er dimensioneret til at bringe huset i renoveringsklasse 1. Det ville ofte være mere rentabelt at installere så mange solceller, at det daglige elforbrug kan dækkes, og den samme inverter kan anvendes.

I Be18 er følgende tilføjet siden trin 5. De tilføjelser, der er foretaget, fremgår af Tabel 45 nedenfor.
Be18-beregningerne fremgår af bilag 10-A6-S, bilag 10-B6-S samt bilag 10-C6-S.

Tabel 45. Indtastninger i Be18 for trin 6 med solceller

Hoveddata	**Efter trin 6 med solceller**
Varmeforsyning, bidrag fra: 5. Solceller	Ja
Solceller	
Panel areal, m^2	4,95
Peak Power (RS), kW/m^2	0,182
System virkningsgrad (Rp), -	0,88
Orientering	V
Hældning	27
Horisont afskæring, ^{o}	0
Skygge til venstre, ^{o}	0
Skygge til højre, ^{o}	0

Efter trin 5 var det samlede energibehov for alternativ A og B ca. 10 kWh/m^2 år højere end den samlede energiramme for renoveringsklasse 1 på 65,0 kWh/m^2 år. Alternativ C var kun 1,2 kWh/m^2 år over. Ved etablering af solcelleanlæg er der ikke sket ændringer på varmebehovet eller det ækvivalente elbehov vedr. overtemperatur i rum. Derimod er elbehovt til bygningsdrift i Be18 faldet, fordi elproduktionen fra solcelleanlægget modregnes og indgår i beregningen af det samlede energibehov. Solcelleanlægget producerer 6,2 kWh/m^2 år for hver af de tre alternativer. Det bør bemærkes, at værdierne for el til bygningsdrift i Tabel 46 er negative fordi elproduktionen er modregnet. Det reelle elbehov til bygningsdrift er noteret i parentes. I alternativ C er det reelle elbehov større, da der skal anvendes el til drift af mekanisk ventilation.

Med etablering af solcelleanlæg overholder huset i de tre alternativer energirammen for renoveringsklasse 1. Af Tabel 46 nedenfor fremgår en opsummering af de overordnede resultater vedr. energibehov efter trin 6 med solceller.

Tabel 46. Energi-rammer og behov efter trin 6 med solceller

Energi-rammer og behov			**kWh/m² år**	
Renoveringsklasse 1, samlet energiramme			65,0	
Renoveringsklasse 2, samlet energiramme			86,7	
	Eksist. forhold	**Alt. A**	**Alt. B**	**Alt. C**
		Efter tin 6 med indv. efteriso.		
Samlet energibehov	146,6	62,8	64,0	54,5
Bidrag til energibehov				
Varme	164,8	84,2	85,5	71,6
El til bygningsdrift	2,7	-5,5 *(0,7)*	-5,5 *(0,7)*	-3,4 *(2,8)*
Overtemperatur i rum	1,4	1,7	1,7	0,0

Da der ikke er sket ændringer i husets klimaskærm med denne afslutningsmulighed siden trin 5, er der ikke sket ændringer i det dimensionerende transmissionstab eller varmetilskuddet. Det samme gør sig gældende med timeantallet over 27 °C og 28 °C, som udtrykker sommerkomforten i det mest solbelastede rum, opholdsstuen. Derfor er der 37 og 9 timer over 27 °C og 28 °C for alternativ A og B, og 36 og 7 timer for alternativ C.

De økonomiske omkostninger i forbindelse med udførslen af solcelleanlæg i trin 6 er for alternativ A, B og C er beskrevet i afsnit 10.1. Husets energitekniske tilstand, i forhold til at blive bragt i renoveringsklasse 1 og 2, er opsummeret i tabellen nedenfor.

Tabel 47. Krav til opfyldelse jf. BR-18 §§ 280-281 efter trin 6 med solceller

Krav der skal opfyldes for at opnå renoveringsklasser jf. BR-18 §§ 280-281	**Renoverings-klasse 1**			**Renoverings-klasse 2**		
Samlet energiramme [kWh/m² år]	*65,0*			*86,7*		
Alternativ	**A**	**B**	**C**	**A**	**B**	**C**
Overholdelse af energiramme	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Reduktion med mindst 30,0 kWh/m² pr. år. af behovet for tilført energi	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Eftervisningen iht. SBi-anvisning 213 Bygningers energibehov med Be1880	✓	✓	✓	✓	✓	✓
En andel af vedvarende energi i den samlede energiforsyning til huset som er fjernvarme	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Overholdelse af BR-18 §§ 382-384 vedr. belysning	*Ej aktuel*			*Ej aktuel*		
Overholdelse af BR-18 § 386 vedr. termisk indeklima	✓	✓	✓	*Ej aktuel*		
Overholdelse af BR-18 §§ 443-449 vedr. ventilation	✓	✓	✓	*Ej aktuel*		

7.7 Opsummering på energioptimering

Indhold og resultater for renoveringstiltagene opsummeres i dette delafsnit, for at fastsætte hvilke energirenoveringstiltag, der skal til i de tre alternativer A, B og C, for at huset kan bringes i renoveringsklasse 1 og 2. Denne viden skal anvendes ved beregning af de økonomiske omkostninger og det totaløkonomiske aspekt i de forskellige alternativer. Indholdet i de tre alternativer er beskrevet i Tabel 8 i afsnit 7. Overordnet er indholdet i de seks trin:

1. Udskiftning af vinduer og yderdøre
2. Efterisolering af tagkonstruktionen
3. Hulmursisolering
4. Forbedring af ventilationsforhold
5. Optimering af varmefordelingsanlæg
6. Indvendig efterisolering eller udvendig efterisolering eller solceller

I Tabel 3 i afsnit 6 blev de samlede energirammer fastsat ud fra beregning. Det er disse energirammer, som husets samlede energibehov skal være lig med eller under. De samlede energirammer er:

- Renoveringsklasse 1: 65,0 kWh/m^2 år
- Renoveringsklasse 2: 86,7 kWh/m^2 år

Derudover er der jf. BR-18 §280 fire krav der skal være overholdt, hvilket er beskrevet i afsnit 4.1.

I tabellen nedenfor er der opsummeret hvilke alternativer og trin, der har bragt huset i renoveringsklasse 1 og 2. Det samlede energibehov er inklusiv primærenergifaktorer. Varme- og el-behovet til bygningsdrift er bidrag til energibehovet. Solceller giver i de tre tilfælde, trin 6 med solceller, et bidrag på 6,2 kWh/m^2 år.

Tabel 48. Opsummering for overholdelse af energirammer

		[kWh/m^2 år]		
Alter-nativ	**Trin nr.**	**Samlet energibehov**	**Varme-behov**	**El-behov**
Eksisterende forhold		146,6	164,8	2,7
Renoveringsklasse 2				
A	5 - Varmefordelingsanlæg	74,5	84,2	0,6
B	5 - Varmefordelingsanlæg	75,5	85,5	0,7
C	4 - Ventilationsforhold	84,7	86,3	4,6
Gennemsnitlig reduktion		68,4	79,5	0,7
Renoveringsklasse 1 *(Det er efterset, at de fire krav i BR-18 §280 er overholdt ud over energirammerne.)*				
A	6 - Udvendig efterisolering	62,7	69,5	0,6
A	6 - Solceller	62,8	84,2	0,6
B	6 - Udvendig efterisolering	63,9	70,8	0,7
B	6 - solceller	64,0	85,5	0,7
C	6 - Indvendig efterisolering	61,5	66,1	2,8
C	6 - Udvendig efterisolering	53,6	56,8	2,8
C	6 - solceller	54,5	71,6	2,8
Gennemsnitlig reduktion		86,2	92,7	1,1

8 Pre- og reboundeffekter

I afsnit 4.3 beskrives, at ved beregninger af bygningers energibehov i Be18 anvendes et fastsat setpunkt for rumopvarmning på 20 °C, som er en gennemsnitstemperatur i hele bygningen året rundt. Et norsk studie beskriver, at den faktiske energibesparelse efter en renovering ofte er lavere i virkeligheden end beregnet. Dette skyldes, at beregningerne ikke tager udgangspunkt i de faktiske temperaturer, der er i bygningen før og efter renoveringen, men der anvendes et fastsat setpunkt for rumopvarmning på 20 °C. Studiet viser ligeledes, at indendørstemperaturen i boliger kan variere meget fra bolig til bolig (THEMA Consulting Group, 2013).

I dette projekt undersøges hvilken effekt prebound og reboundeffekter har på energibehovet til bygningsdrift. Der beregnes på alternativ C, trin 6 med udvendig efterisolering, som kan bringe huset i renoveringsklasse 1. Der regnes med dette alternativ fordi det har det laveste varmebehov jf. Tabel 48, og har et stort energibesparelsespotientiale.

Ved beregning af energibehovet til bygningsdrift med preboundeffekt, anvendes et setpunkt for rumopvarmning på 19 °C i en Be18-beregning med husets eksisterende forhold. For at beregne effekten af reboundeffekten anvendes et setpunkt for rumopvarmning på 21 °C i Be18-beregningen for det ovenfor beskrevne alternativ. Be18-beregningerne fremgår af bilag 11 og 12. Temperaturen 19 °C anvendes ved preboundeffekten, da det kan være gennemsnitstemperaturen i et hus, hvor et eller flere rum er lukkede, og der er skruet ned for varmen. Ved reboundeffekten anvendes 21 °C, da mennesker ofte skruer lidt op for varmen for at opnå en bedre komfort, når der opleves, at huset er velisoleret og tæt.

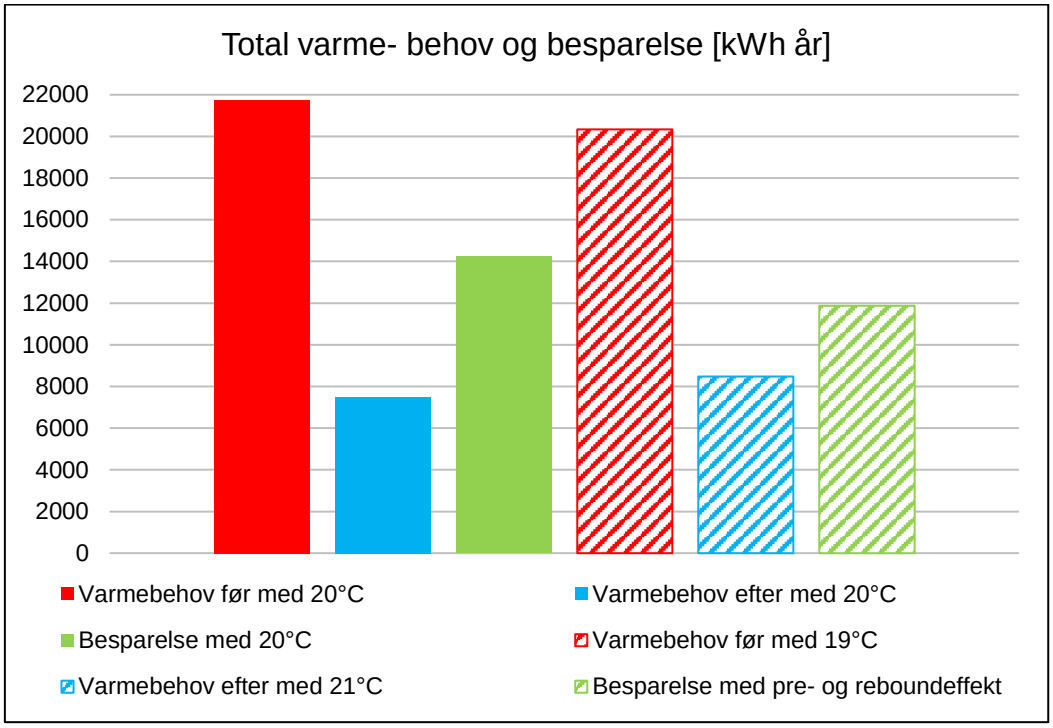
I Tabel 49 nedenfor ses varme- og elbehov med og uden pre- og reboundeffekter. Da der næsten ikke sker nogen forandringer i elbehovet til bygningsdrift, behandles dette ikke yderligere.

Tabel 49. Varme- og elbehov til bygningsdrift med og uden pre- og reboundeffekt

Be18 beregning	**[kWh/m² år]**	
	Varme-behov	**El-behov**
Eksisterende forhold ved 20 °C	164,8	2,7
Eksisterende forhold ved 19 °C	154,1	2,6
Alternativ C med - Udvendig efterisolering ved 20 °C	56,8	2,8
Alternativ C med - Udvendig efterisolering ved 21 °C	64,2	2,8

Med husets eksisterende forhold med en indendørs gennemsnitstemperatur på 19 °C er varmebehovet 10,7 kWh/m² år lavere end med 20 °C. Efter energioptimeringen i alternativ C med udvendig efterisolering er varmebehovet 7,4 kWh/m² år højere med en indendørs gennemsnitstemperatur på 21 °C end ved 20 °C. Resultaterne viser tydeligt, at temperaturen indendørs har en betydning for energibehovet.

Den beregnede besparelse i varmebehovet med en gennemsnitlig temperatur indendørs på 20 °C er 108,0 kWh/m² år. Med pre- og reboundeffekter er besparelsen i varmebehovet 89,9 kWh/m² år, som er 18,1 kWh/m² år lavere end ved beregningerne med 20 °C. Samlet set for hele huset er det 2389 kWh pr. år. Det betyder, at husets ejer har et forkert beslutningsgrundlag, hvis der ikke beregnes med de korrekte gennemsnitlige temperatur indendørs.



Figur 6. Total varmebehov og -besparelse pr. år

Grafen ovenfor viser med forskellen på de røde søjler, at preboundeffekterne giver et mindre varmebehov, imens forskellen på de blå søjler viser at reboundeffekten giver et større varmebehov. Tilsammen danner det en mindre besparelse i varmebehovet på ca. 16,8% lavere end først antaget.

9 Bygningsfysiske overvejelser ved energirenovering

I forbindelse med renovering af en bygning, er det vigtigt at tage højde for de konsekvenser det kan have. Når der ændres på konstruktioner, ventilationsforhold, interne belastninger og klimatiske forhold, ændres der på konstruktionernes sundhed og forhold vedr. indeklima. Nedenfor behandles tre forhold, som er ændret i huset i forbindelse med de seks trin, som er beskrevet i afsnit 7. Der beskrives hvilke konsekvenser de kan have, og det vurderes om tiltagene er bygningsfysiske forsvarlige. Slutteligt beskrives overordnet et antal yderligere forhold, der bør overvejes i forbindelse med energirenovering.

9.1 Loftkonstruktion med eksisterende alu-kraft

Efterisolering af tagkonstruktioner har i mange år været et emne, der har været genstand for megen diskussion og forskning. I dette projekts trin 2 efterisoleres tagkonstruktionen oppefra med løsfyld uden at den eksisterende alu-kraftfolie udskiftes til en ny dampspærre af PE-folie. Ved inspektion af huset i februar 2022 blev det konstateret, at den eksisterende alu-kraftfolie ikke var ødelagt og samlingerne er med overlæg uden at være tapede.

I SBi-anvisning 240, Efterisolering af småhuse fra 2012, beskrives det, at der skal udføres en tæt dampspærre ved efterisolering oppefra. Der er siden 2012 udført en del forskning på det område, der viser at *"loftrum kan efterisoleres uden brug af dampspærre, hvis der ikke er fugtproblemer inden efterisoleringen. Tilsyneladende er ventilationen så afgørende, at det overdøver det meste andet"* (Møller, Eva B., 2020). Denne viden er senere blevet publiceret i BYG-ERFA-blad nr. (37) 21 06 15, hvor det præciseres, at der skal taget en vurdering af den konkrete sag, som viser at følgende betingelser er opfyldt inden efterisoleringen kan udføres:

- Tagrummet skal være tilgængeligt for inspektion
- Lufttætheden i loftskonstruktionen er tilstrækkelig
- Tagrummets ventilation er i overensstemmelse med gældende retningslinjer
- Der er ikke spalter mellem isolering og spær mv., som tillader opstrømning af fugtig rumluft
- Der er ikke synlige tegn på opfugtning eller skimmelsvampevækst

Iht. SBi-anvisning 224. Fugt i bygninger tabel 9, er den kritiske relative fugtighed for skimmelvækst på overflader af træ og træbaserede materialer 75% ved langtids-påvirkning ved 20 °C. Iht. BYG-ERFA-blad nr. 03 07 24 skal træfugtigheden i en periode være over 20%, for at svampe kan angribe sundt træ, hvilket svarer til ca. 87% relativ fugtighed. De fleste svampe foretrækker temperaturer omkring 15-25 °C.

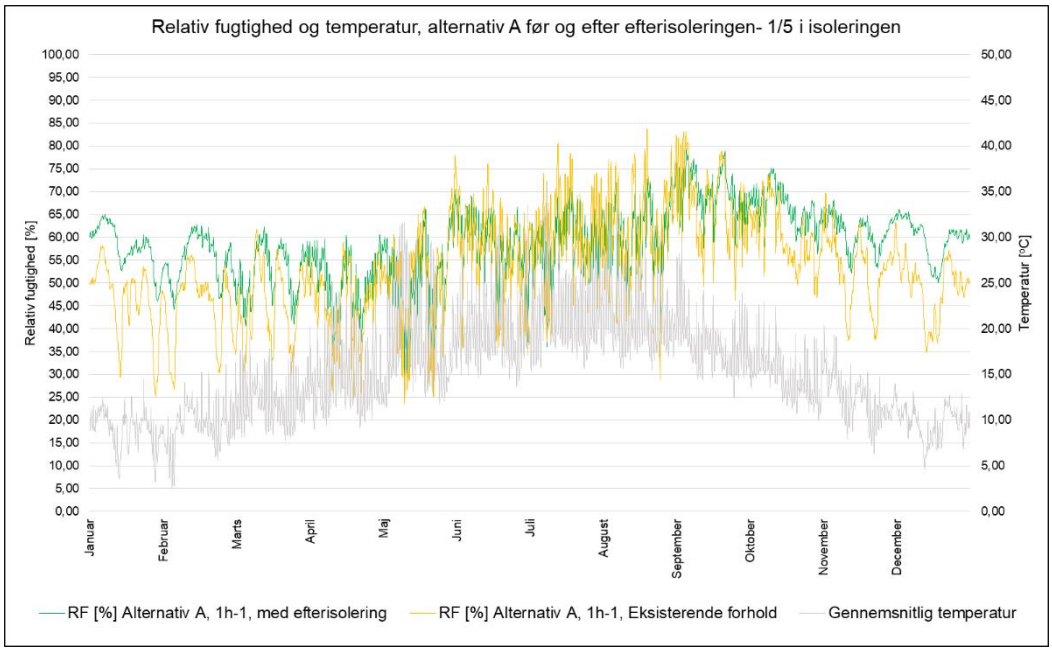
I forbindelse med efterisolering af tagkonstruktionen uden at skifte den eksisterende alu-kraftfolie, er der foretaget et antal simuleringer af fugtforholdene i tagrummet med det formål at eftervise, at denne løsning er bygningsfysisk forsvarlig. Simuleringerne er foretaget med programmet WUFI®Pro, som er beskrevet i afsnit 4.5.2. Der er i alt udført 6 simuleringer, som viser følgende:

- 1 stk. De eksisterende forhold med alu-kraftfolie og 100 mm isolering,
- 3 stk. for alternativ A, efterisoleret med eksisterende alu-kraftfolie.
  Luftskifte i tagrummet= $1h^{-1}$, $0,5h^{-1}$ og $0h^{-1}$
- 1 stk. for alternativ B+C, efterisoleret med ny dampspærre.
  Luftskifte i tagrummet= $1h^{-1}$
- 1 stk. for alternativ A, efterisoleret med eksisterende alu-kraftfolie.
  Luftskifte i tagrummet= $1h^{-1}$. Fugtbelastningsklasse 3

Der er simuleret med luftskifter på $1h^{-1}$ og derunder, for at eftervise hvilken betydning det har, hvis der ikke er ventilation i tagrummet. Ud over simuleringer med disse luftskifter, er der simuleret med luftskifter på $2h^{-1}$ og $5h^{-1}$. Resultaterne af disse simuleringer viste ikke væsentlige forskelle i forhold til simuleringer med et luftskifte på $1h^{-1}$.

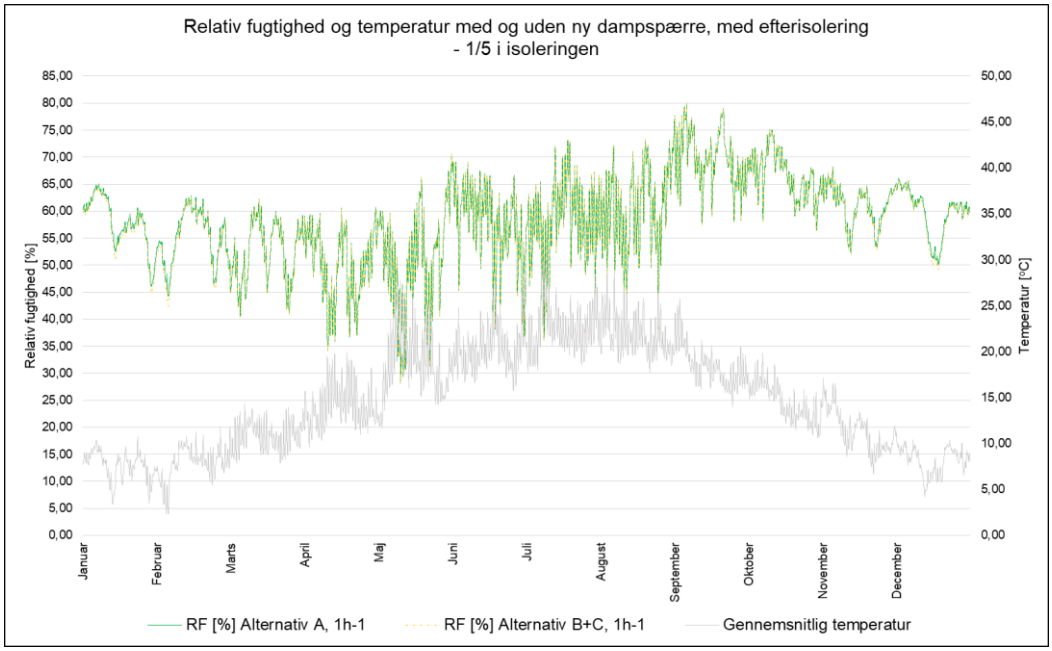
Materialerne, der er anvendt i simuleringen, svarer tæt overens med de virkelige materialer vedr. varme- og hygrotekniske egenskaber. I de seks simuleringer er der anvendt fugtbelastningsklasse 2 i forhold til luftfugtighed indendørs, som svarer til boliger med normal beboelsestæthed og ventilation jf. DS/EN ISO 13788. Da der endnu ikke findes danske klimafiler til WUFI, er klimafilen for Bremerhaven, Tyskland anvendt, da klimaet der minder om klimaet for husets beliggenhed. I simuleringerne for alternativ A er der indlagt en fugtkilde, som svarer til fugtvandringen gennem utætheder fra indeklimaet og ud i tagkonstruktionen. Der er anvendt klasse B iht. DIN 4108. Alle simuleringer er foretaget over fire år, for at sikre periodestabilitet. Det er dog kun resultater for det fjerde år, der præsenteres i graferne nedenfor. Resultaterne for alle simuleringer er taget yderst i isoleringslaget, da der her er en stor variation i fugt- og temperaturforhold. Resultaterne for simuleringerne fremgår af bilag 13.

Figur 7 nedenfor viser, at de fugtmæssige forhold yderst i isoleringslaget før og efter en efterisolering med den eksisterende alu-kraftfolie er forskellige ved et luftskifte på $1h^{-1}$. Før efterisoleringen var den gennemsnitlige fugtighed på 56%, hvor den efter efterisoleringen er ca. 65%. Det hænger sammen med, at temperaturen generelt er højere i den yderste del af isoleringen før efterisoleringen, og dermed er den relative fugtighed også lavere. Efter der er udført efterisolering, er den højeste relative fugtighed ca. 90%. I ca. 17,5% af tiden er den relative fugtighed over 74,9%. I disse perioder er temperaturen samtidigt under 20 °C.



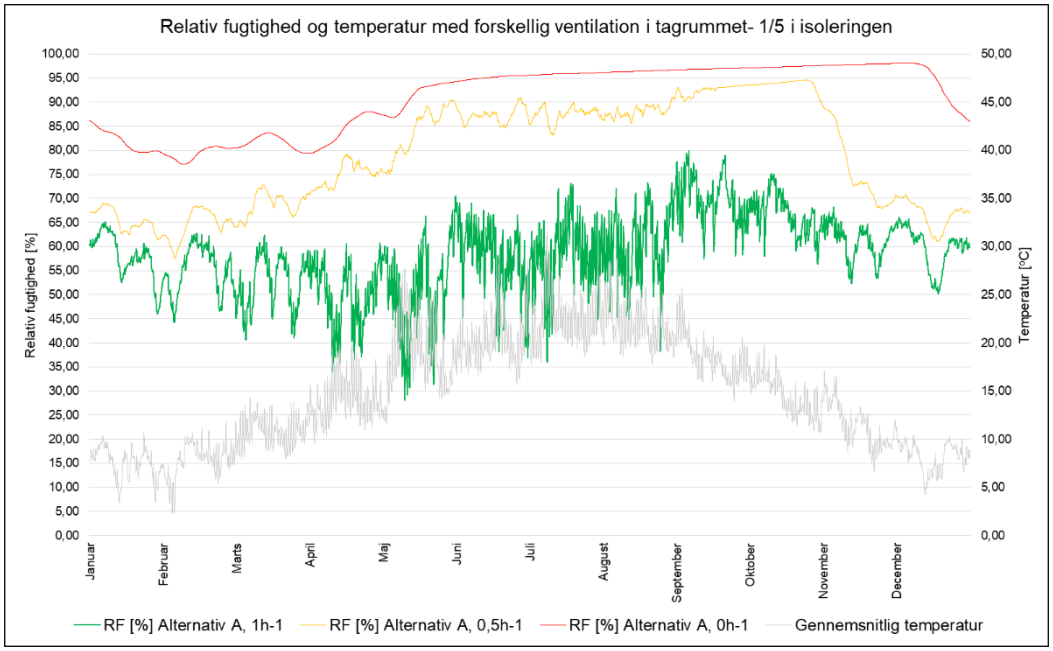
Figur 7. Relativ fugtighed og temperatur, alternativ A før og efter efterisoleringen

Ved en sammenligning af resultaterne for simuleringer af alternativ A med efterisolering, sammenlignet med resultater for alternativ B og C, hvor der er en ny dampspærre, viser det sig, at der i begge tilfælde er en gennemsnitlige relative fugtighed ca. 65% med en forskel på 0,24 % relativ fugtighed. De største værdier i begge tilfælde er ca. 90% relativ fugtighed, også med en forskel på 0,24 % relativ fugtighed. Det er alternativ A, der i denne sammenligning, har de største værdier. I cirka 17,5% af tiden er den relative fugtighed over 74,9% for alternativ A, hvor det for alternativ B og C er 16,2% af tiden. Variationerne i fugt og temperatur følger hinanden tæt i begge tilfælde.



Figur 8. Relativ fugtighed og temperatur med og uden ny dampspærre, med efterisolering

De to simuleringer med et luftskifte på 0,5 og 0 gange i timen for alternativ A efterviser, at ventilationen i tagrummet har en stor betydning for luftfugtigheden. Hvis luftfugtigheden bliver for høj, kan det medføre skimmelvækst og eventuelle svampeangreb. Figuren nedenfor viser tydeligt, at jo dårligere ventilationsforholdene er i tagrummet, jo højere bliver den relative fugtighed. Der vil med ringe eller ingen ventilation af tagrummet være gode vækstbetingelser for skimmel og andre svampearter.



Figur 9. Relativ fugtighed og temperatur med forskellig ventilation i tagrummet

Ved simulering med fugtbelastningsklasse 3, som kunne være over et badeværelse for alternativ A med et luftskifte på 1 gang i timen i tagrummet, viser det sig, at den relative fugtighed i gennemsnit er 65,05% og der er en relativ fugtighed på over 74,9% i 19,1% af tiden. Med fugtbelastningsklasse 2 er der en gennemsnitlig relativ fugtighed på 64,78%. Der er en relativ fugtighed på over 74,9% i 17,5% af tiden.

Resultaterne af simuleringerne i WUFI®Pro viser, at det er bygningsfysisk forsvarligt, at efterisolere tagrummet og bevare den eksisterende alu-kraftfolie, så længe ventilationsforholdene opfylder gældende retningslinjer, som er 1/500 af det bebyggede areal (Brandt, 2013).

9.2 Hulmursisolering

I trin 3 efterisoleres ydervæggen med løsfyld, som blæses ind i hulrummet mellem skalmuren og de eksisterende 50 mm isolering. Denne løsning giver erfaringsmæssigt ingen fugttekniske problemer iht. SBi-anvisning 240, Efterisolering af småhuse kap. 5.3.1. Dog frarådes papiruld jf. BYG-ERFAblad nr. (21) 111227. Der er en række forhold, som man skal være opmærksom på i forbindelse med hulmursisolering, disse er følgende:

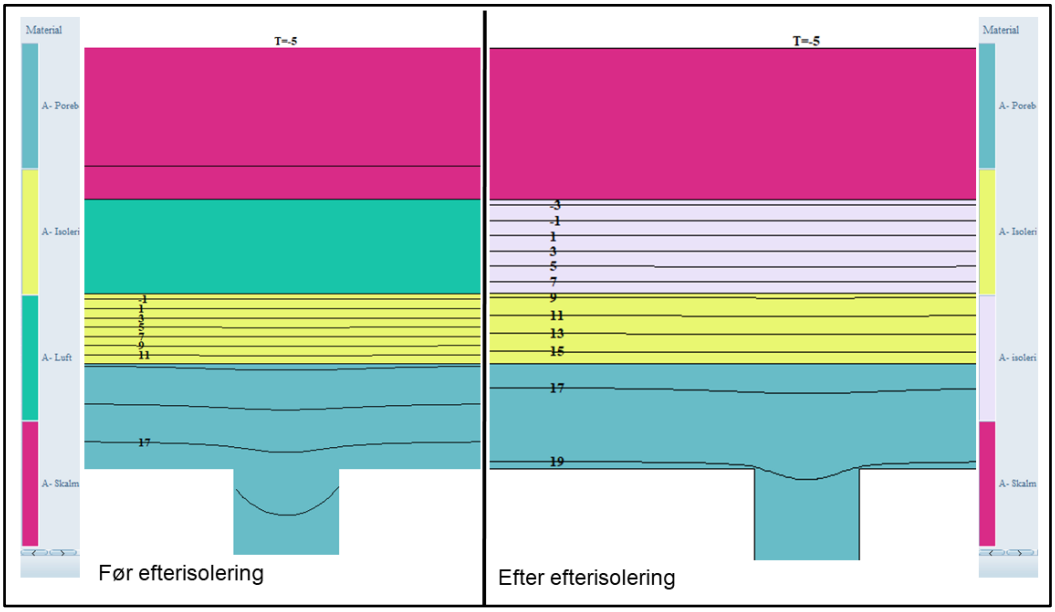
- Hvis formuren viser tegn på fugtskader, kan dette forværres efter hulmursisoleringen
- For- og bagmur skal være tætte, så hulmursisoleringen forbliver i hulmuren
- Der kan forekomme steder, hvor hulmursisoleringen ikke er så effektiv på grund af kuldebroer, f.eks. mørtelrester eller udmuringer

Efterisolering af hulmuren vil medvirke til, at *"formuren bliver koldere efter hulmursisolering. Dette medfører dels reduceret fordampning fra formurens udvendige overflade dels øget fugtindhold i formuren om vinteren, fordi lavere temperatur øger kondens af den vanddamp indefra, der når formuren. Herved øges risiko for fx frostsprængninger".* Samtidigt beskrives det, at *"Generelt for teglsten er gule maskinsten mere frostfølsomme end røde – og maskinsten mere frostfølsomme end blødstrøgne"* (Klavsen, 2011).

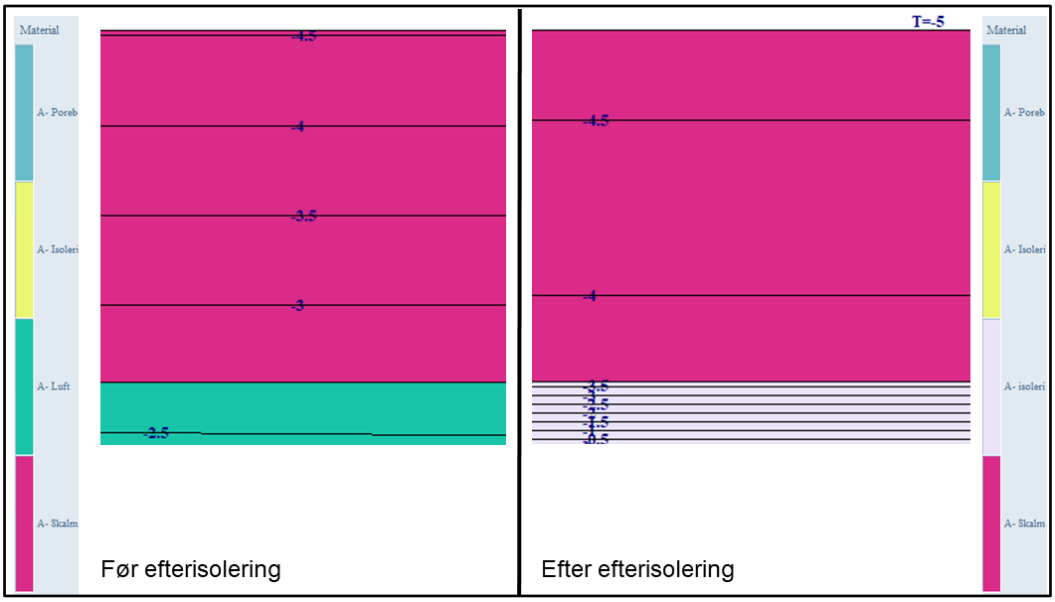
Der er med programmet HEAT2 beregnet hvilke konsekvenser det har, at ydervæggen hulmursisoleres, for at det kan vurderes, om det er et bygningsfysisk forsvarligt tiltag. Der er anvendt materialer, der har de samme varmetekniske egenskaber som der er anvendt i U-værdiberegningerne for de eksisterende forhold og i trin 3. Der er anvendt de samme overgangsisolanser som beskrevet i DS 418 tabel 6.2.1. Der er anvendt en indvendig temperatur på 20 °C. Den udvendige temperatur er fastsat til -5 °C, da det vurderes at være en rimelig temperatur for husets beliggenhed, der kan være til stede over længere tid (5 døgn) i vinterperioden. Resultaterne for beregningerne fremgår af bilag 14. Beregningen i HEAT2 for et normalsnit i ydervæggen er valideret med U-værdiberegningerne for de eksisterende forhold, med en difference på 0,0002 W/m^{2}K, derfor anses begge beregningstyper at være valide.

Figur 10 nedenfor viser, at uden hulmursisolering vil der være en temperatur på -3 °C ca. 4/5 inde i formuren fra forsiden. Med hulmursisolering vil der være -3 °C lidt inde i isoleringen bag formuren. Det betyder, at formuren er koldere. På Figur 11, hvor formuren ses tættere på, ses det at den er en grad koldere på cirka samme punkt med hulmursisolering. Da formuren ikke har frostskader i forvejen og den er i god stand, vurderes det at en temperaturdifferens på 1 °C i formuren ikke giver anledning til frostsprængninger. Samtidigt vurderes det, ud fra temperaturforholdene og hulmursisoleringens fugttekniske egenskaber, at fugtforholdene i ydervæggen ikke forværres i en sådan grad, at det kan skabe korrosion i trådbindere.

Ud fra ydervæggens stand, anbefalinger i SBi-anvisning 240, BYG-ERFAblad nr. (21) 111227 og beregningerne med HEAT2 vurderes det samlet set, at hulmursisoleringen er en bygningsfysisk forsvarlig løsning.



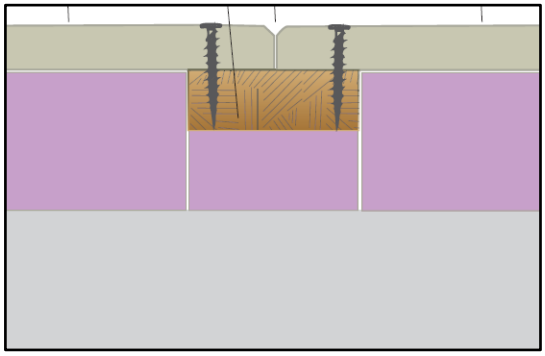
Figur 10. Temperaturforløb i ydervæg uden og med hulmursisolering.



Figur 11. Temperaturforløb i formuren uden og med hulmursisolering.

9.3 Skillevæg/ydervæg ved indvendig efterisolering

I trin 6 kunne alternativ C med indvendig efterisolering bringe huset i renoveringsklasse 1, som beskrevet i afsnit 7.6.1. Den indvendige efterisolering består af 55 mm trykfast plademateriale af super XPS med en lav varmeledningsevne (λ=0,027), hvor der er limet 13 mm gipsplade på pladerne af super XPS. Udover at have en lav varmeledningsevne, har pladerne en lukket porestruktur og er ugennemtrængelige for fugt/damp (Hansen T. K., 2021).



Figur 12. Montering af efterisoleringsplader *(Jackon brochure)*

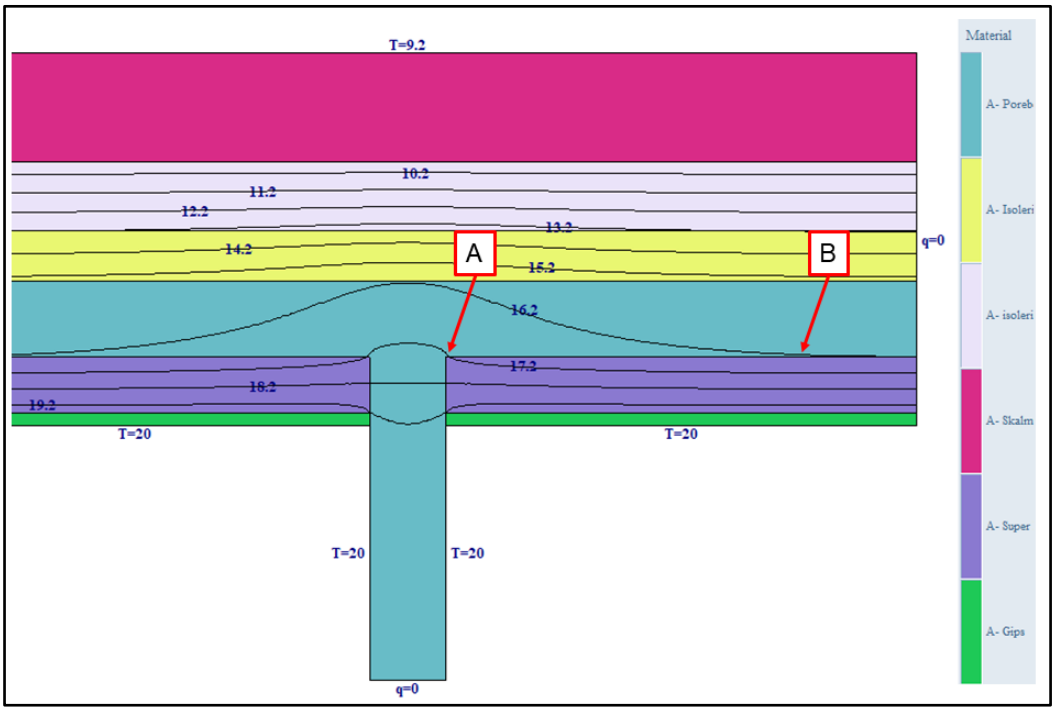
Der hvor skillevæg støder op mod bagmuren, vil der opstå en kuldebro og eventuel mulighed for fugtindtrængning med skimmelvækst til følge. For at eftervise temperatur- og fugtforholdene ved kuldebroen, er der er i HEAT2 lavet en beregning af temperatur-forløbet gennem konstruktionen. De varmetekniske egenskaber for materialerne er de samme, som der er anvendt i U-værdiberegningerne for trin 6 i bilag 10. Resultaterne fra beregningerne i HEAT2 sammenholdes med fugtbelastningen indendørs. Til disse beregninger er en gennemsnitlige lufttemperaturen udendørs på 9,2 °C, inde-temperaturen på 20 °C samt en relativ luftfugtighed på 57% anvendt. Dette er de klimatiske forhold i oktober måned ved fugtbelastningsklasse 2, som er boliger med normal beboelsestæthed og ventilation iht. SBi-anvisning 224, Fugt i bygninger tabel 4.

På Figur 13 nedenfor ses det, at der i punktet A er 17,2 °C ved bagsiden af den indvendige efterisolering, hvor bagmur og skillevæg samles. I punktet B er der 16,2 °C, som er bag efterisoleringspladen længere inde på vægfeltet.

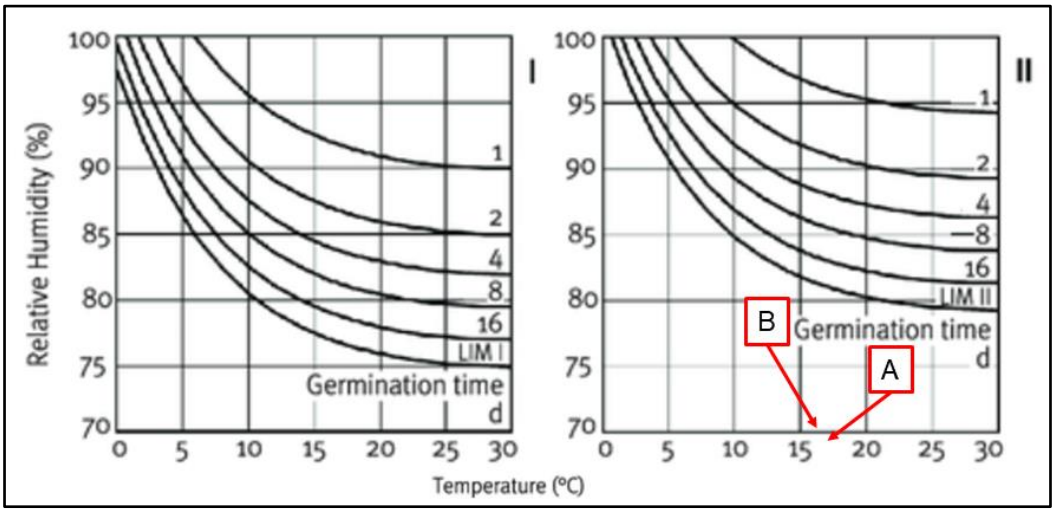
Ved anvendelse af damptrykstabellen, SBi-anvisning 224, tabel 23 aflæses vanddampindholdet i mættet tilstand (Vp_m) ved 20 °C til 17,28 g/m^3, hvilket svarer til et vanddampindhold (Vp) på 9,85 g/m^3 ved 57% relativ fugtighed. Ved 17,2 °C i punktet A og 16,2 °C i punktet B er vanddampindholdet i mættet tilstand ($Vp_{m,A}$) 14,65 og ($Vp_{m,B}$)13,79 g/m^3. Den relative fugtighed i punktet A beregnes til: $(Vp / Vp_{m,A}) \cdot 100 =$ 67,24%. Den relative fugtighed i punktet B beregnes til: $(Vp / Vp_{m,B}) \cdot 100 =$ 71,43%.

For at efterisolering kan udføres bygningsfysisk forsvarligt, er det nødvendigt at fjerne alt organisk materiale, som f.eks. tapet inden isoleringspladerne monteres. Derudover skal murværk være i god stand, så slagregn ikke trænger nemt ind i ydervæggen (Møller, Eva B., 2012). Ved anvendelse af isoleringsplader er det ligeledes vigtigt at sørge for ekstra tætningsforanstaltninger, dels mellem isoleringspladerne, dels hvor pladerne støder op til eksisterende gulv, loft og indervægge, for at undgå uønsket høj relativ fugtighed på den eksisterende mur (Hansen T. K., 2021). Derved kan fugtniveauerne i punkterne A og B, som ovenfor beregnet, reduceres.

Hvis den relative fugtighed i punkterne A og B bliver ca. 67% og 71% og alt organisk materiale er fjernet, er risikoen for skimmelvækst dog begrænset jf. de generaliserede isopletsystemer på Figur 14 af Sedlbauer (Havinga & Schellen, 2018) , som viser forudsigelser af tid indtil spiring for organisk og uorganisk materiale. Kurven til højre viser, at tiden indtil spiring er uendelig lang for uorganisk materiale.



Figur 13. Fugtforløb gennem ydervæg med indvendig efterisolering ved skillevæg



Figur 14. Generaliserede isopletsystemer af Sedlbauer (Havinga & Schellen, 2018)

Hvis den indvendige efterisolering kan udføres korrekt efter producentens anvisninger, samt anbefalinger fra SBi-anvisninger og BYG-ERFA-blade, vurderes det, at løsningen er bygningsfysisk forsvarlig.

9.4 Andre forhold

I forbindelse med energirenovering af et hus, er det vigtigt at gøre en del overvejelser inden arbejdet igangsættes, da konsekvenserne kan være forskellige fra hus til hus, fra løsning til løsning. Der skal laves en afvejning mellem fordele og risici. Dette er bl.a. følsomhed over for fejl i planlægning og udførsel, konsekvenser ved svigt og brugsmæssige forhold, herunder robusthed.

Nogle løsninger i forbindelse med renovering er følsomme over for fejl i udførslen, men hvis de bliver udført korrekt, kan de være sikre at bruge. Derfor kræver de ekstra omhu i planlægningen. Hvis der sker svigt, kan det medføre bygningsskader, ofte på grund af fugt, hvilket kan føre til sundhedspåvirkninger af husets brugere og svigt i husets bærende dele. De brugsmæssige forhold er ligeledes vigtige at tage hensyn til, da vedligeholdelsen kan reduceres ved at vælge løsninger, materialer og overflader, der er robuste overfor slid og slag (Møller, 2012).

Ved tætning af husets klimaskærm, reduceres den naturlige ventilation gennem utilsigtede åbninger i klimaskærmen - kaldt infiltration. Dette medfører, at den relative luftfugtighed samt den generelle luftforurening i huset stiger. Derudover kan radonniveauet ligeledes stige, hvis konstruktionerne mod terræn ikke er tætnet tilstrækkeligt, eller der ikke er gjort andre foranstaltninger mod et forhøjet radonniveau. Derfor skal der være et øget fokus på ventilation af huset (Rasmussen & Nicolajsen, 2007), (Rasmussen T. V., 2016).

Det fremtidige klima vil ligeledes påvirke husets konstruktioner, energibehovet samt indeklimaet. Den globale opvarmning, som nærmer sig 1,5°C i den nære fremtid, som beskrevet i IPCC's sjette hovedrapport, vil reducere behovet for opvarmning, men måske øge behovet for ventilation eller køling. Forandringer i nedbørsmængder og vind vil samtidig påvirke husets konstruktioner, som skal være robuste nok til at modstå klimaet for at bygningsskader undgås. Tilsammen danner klimaforandringerne nye forudsætninger for hvordan huset yder.

10 Totaløkonomi

I afsnit 7.7 blev der summeret op på hvilke alternativer og trin, der kan bringe huset i renoveringsklasse 1 og 2. De enkelte trin i de tre alternativer har en økonomisk investeringsomkostning her og nu. Derudover er der omkostninger over tid til vedligehold og udskiftning af de enkelte bygningsdele. Efter energirenoveringen er der også sket en ændring i omkostninger til energi. I det følgende beskrives omkostningerne til at bringe huset i renoveringsklasse 1 og 2. Derudover beskrives beregningerne af det totaløkonomiske aspekt samt resultaterne deraf. Slutteligt præsenteres resultaterne, hvor følsomheden på to parametre - energipris og kalkulationsrente - er beregnet.

10.1 Renoveringsomkostninger

Omkostningerne til de enkelte trin i alternativ A, B og C er beregnet med kalkulationsprogrammet Sigma Entreprise, som kort er beskrevet i afsnit 4.6. De enkelte priser er hentet i prisbøgerne fra Molio (tidligere V&S prisdata) Renovering – Bygningsdele 2022 samt Renovering – Fagdele 2022. Priserne er fastsat efter byggeomkostningsindeks for boliger fra Danmarks statistik, i alt - 4. kvartal 2021 til indeks 113 (Molio, 2022). I kalkulationen er der ikke foretaget geografisk indeksregulering, derfor er prisfaktoren 1,0. Denne faktor anvendes, fordi at *"den regionale prisfaktor kun giver en overordnet rettesnor om regionens lønniveau. Der vil fx kunne forekomme et højere prisniveau i større byer inden for regionen"* (Molio, 2022). Prisfaktoren for Sydjylland er 0,9. Enkelte mindre priser er fastsat ud fra ud fra et fagligt skøn, f.eks. omkostninger til tømrerarbejde vedr. at skabe luftudveksling under døre eller honorar til blowerdoortest.

Omkostningerne til at bringe huset i renoveringsklasse 1 og 2 for alternativ A, B og C er opsummeret i Tabel 50 nedenfor. De enkelte omkostninger er udspecificeret i enkelte poster i hvert renoveringstrin og fremgår af bilag 15.

Tabel 50. Omkostninger for at bringe huset i renoveringsklasse 1 og 2

Alter-nativ	Trin nr.	Samlet pris incl. moms, kr.
Renoveringsklasse 2		
A	5 - Varmefordelingsanlæg	335.520
B	5 - Varmefordelingsanlæg	540.874
C	4 - Ventilationsforhold	558.161
Renoveringsklasse 1		
A	6 - Solceller	372.769
A	6 - Udvendig efterisolering	506.086
B	6 - solceller	578.123
C	6 - solceller	646.878
B	6 - Udvendig efterisolering	711.440
C	6 - Indvendig efterisolering	769.609
C	6 - Udvendig efterisolering	780.195

Investeringsprisen for at bringe huset i renoveringsklasse 2 med alternativ C er 558.161 kr., hvor den er 780.195 kr. for at bringe huset i renoveringsklasse 1 i alternativ C med udvendig isolering, som er den dyreste investering. Det giver en difference på 222.034 kr.

10.2 Totaløkonomiske beregninger i LCC-byg

I programmet LCC-byg er det totaløkonomiske aspekt for de 10 muligheder, der kan bringe huset i renoveringsklasse 1 og 2 som der er opsummeret i afsnit 7.7, beregnet.

Beregningsforudsætningerne for de enkelte beregninger er ens, disse er følgende:

- Beregningsperiode: 50 år
- Rente og prisudvikling: Fast realrente med kalkulationsrente på 3%. De øvrige prisudviklinger er ligeledes standardsatser i LCC-byg

I beregningen for de husets eksisterende forhold, er der fastsat en baseline for elforbrug, drikke- og spildevand. Forbruget er fastsat til følgende:

- El: 5000 kWh pr. år, fordelt på 356,4 kWh til bygningsdrift, resten til forbrug
- Drikkevand og spildevand: 160 m^3 pr. år

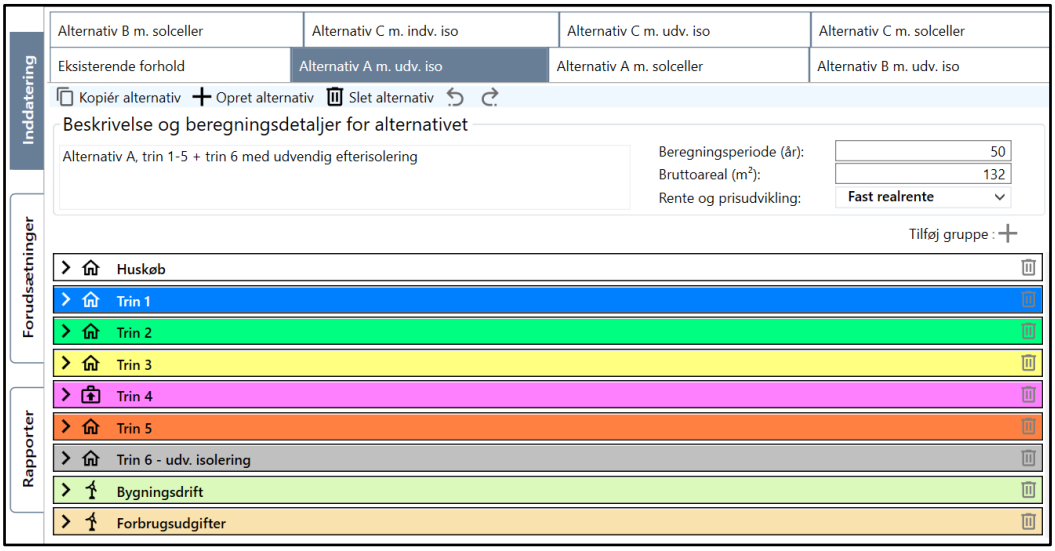
El forbruget på 5000 kWh er fastsat ud fra tal indhentet fra Energistyrelsen, hvor det beskrives at *"En gennemsnitsdansker bruger 1.600 kWh strøm om året. Men du kan skære elforbruget ned til 1.000 kWh/år pr. person uden at give afkald på komforten"* (Energistyrelsen, 2022). Ud fra disse tal, er der derfor fastsat det der svarer til 1250 kWh pr. pers pr. år ved fire personer. Denne baseline for elforbrug er fordelt på 356,4 kWh til bygningsdrift og 4643,6 kWh til forbrug. Andelen til forbrug er fast i alle LCC-beregningerne, mens elforbruget til bygningsdrift kan variere, og dermed varierer det totale elforbrug. Enhedsprisen for el der anvendes i LCC-beregningerne er 2,21 kr. pr. kWh inkl. Moms, som er nationale gennemsnitsværdier.

Vandforbruget er fastsat ud fra statistikken om udvikling i vandforbruget, 1976-2020 offentliggjort af DANVA i 2021 (With, 2021). I denne statistik har vandforbruget de sidste 10 år gennemsnitligt lagt på ca. 38 m^3 pr. pers pr. år. I dette projekt er der anvendt 160 m^3, som svarer til 40 m^3 pr. pers pr. år ved fire personer. Der anvendes den samme mængde for spildevand. Disse baselines er den samme i alle LCC-beregninger, og varierer ikke. Enhedsprisen for drikkevand der anvendes i LCC-beregningerne er 24,00 kr. pr. m^3 inkl. Moms, som er nationale gennemsnitsværdier. Enhedsprisen for spildevand er 37,00 kr. pr. m^3 inkl. moms, som er nationale gennemsnitsværdier.

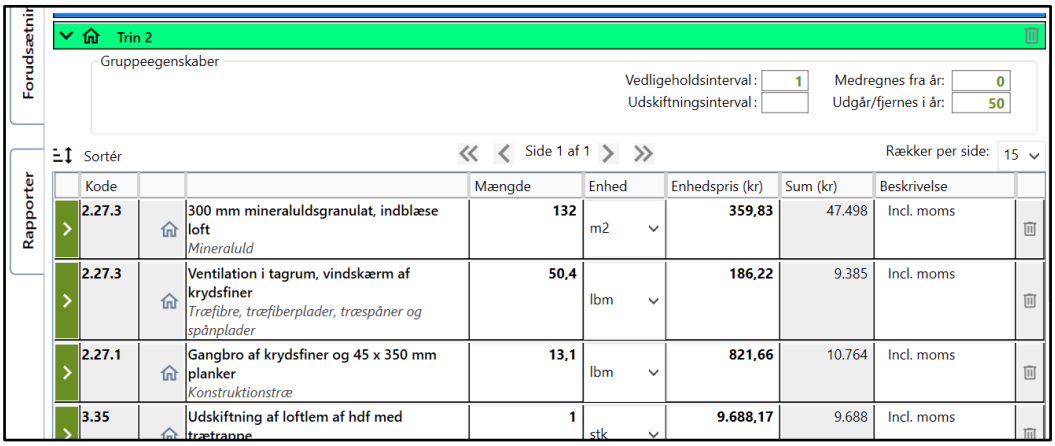
Huset er opvarmet med fjernvarme, som er prissat til 0,65 kr. pr. kWh inkl. Moms. Dette er ligeledes en national gennemsnitsværdi.

Der er i beregningerne fastsat en købspris for huset, hvor det forefindes i energimæssig original stand på 1.750.000 kr., hvilket ca. er 13.258 kr./m^2. Denne købspris er fastsat ud fra kvadratmeterpriserne for huse i den stand, i området hvor huset er beliggende.

På Figur 15 og Figur 16 nedenfor ses, at hver beregning i LCC-byg er sat op i ensrettet struktur, hvor huskøb, de anvendte renoveringstrin, energi til bygningsdrift samt energi til forbrug er kategoriseret. Hver kategori er underopdelt i f.eks. bygningsdele. Denne struktur gør det muligt at anvende forskellige levetider, vedligeholdelsesomkostninger og -intervaller på de forskellige bygningsdele osv. Beregningerne i LCC-byg fremgår af bilag 16 og 17.



Figur 15. Udklip fra beregning i LCC-byg, opdelt i grupper



Figur 16. Udklip fra beregning i LCC-byg, underopdeling i grupper

10.3 Resultater af LCC-beregninger

Resultaterne af de totaløkonomiske beregninger i LCC-byg opgøres nedenfor fordelt på de tre alternativer, A, B og C og de afslutningsmuligheder, der skal til for at bringe huset i renoveringsklasse 1 og 2, som opsummeret i afsnit 7.7.

Resultaterne nedenfor er sorteret efter størrelse – mindste til største. De er opgjort i nutidsværdi med restværdi, som udtrykker *"summen af de tilbagediskonterede fremtidige pengestrømme. Nutidsværdien er et udtryk for hvor mange penge, der skal sættes til side i dag for at kunne afholde alle fremtidige omkostninger i beregningsperioden med den valgte kalkulationsrente"* (Haugbølle, 2016). Derudover opgøres resultaterne ligeledes i årsomkostninger med restværdi, som udtrykker "*en annuitet af nutidsværdien. Årsomkostningen udtrykker dermed hvor mange penge, der gennemsnitligt skal afsættes hvert år i beregningsperioden"* (Haugbølle, 2016). I bilag 18 og 19 fremgår nutidsværdien og årsomkostninger ligeledes eksl. Restværdi pr. m^2. Restværdien er et udtryk for den værdi investeringen er værd efter beregningsperiodens ophør.

Tabel 51. Totaløkonomisk beregning af renoveringstrin der kan bringe huset i renoveringsklasse 2

Renoveringstrin der kan bringe huset i renoveringsklasse 2	Nutids-værdi pr. m^2	Nutids-værdi i alt	Års-omkostning pr. m^2	Års-omkostning i alt
Eksisterende forhold	-29.589	-3.905.748	-1.150	-151.800
Alternativ A t.o.m. trin 5	-32.050	-4.230.600	-1.246	-164.472
Alternativ B t.o.m. trin 5	-34.896	-4.606.272	-1.356	-178.992
Alternativ C t.o.m. trin 4	-38.709	-5.109.588	-1.504	-198.528

Resultaterne for årsomkostninger i Tabel 51 viser, at differencen på årsomkostningen for det billigste og dyreste alternativ, der kan bringe huset i renoveringsklasse 2 er -34.065 kr. Årsomkostningen svarer til en fast årlig husleje, hvor alle de medregnede omkostninger er inkluderet, hvilket er huskøb, renoveringstiltag, varme og el til bygningsdrift, el, vand til forbrug samt vandafledningsafgift.

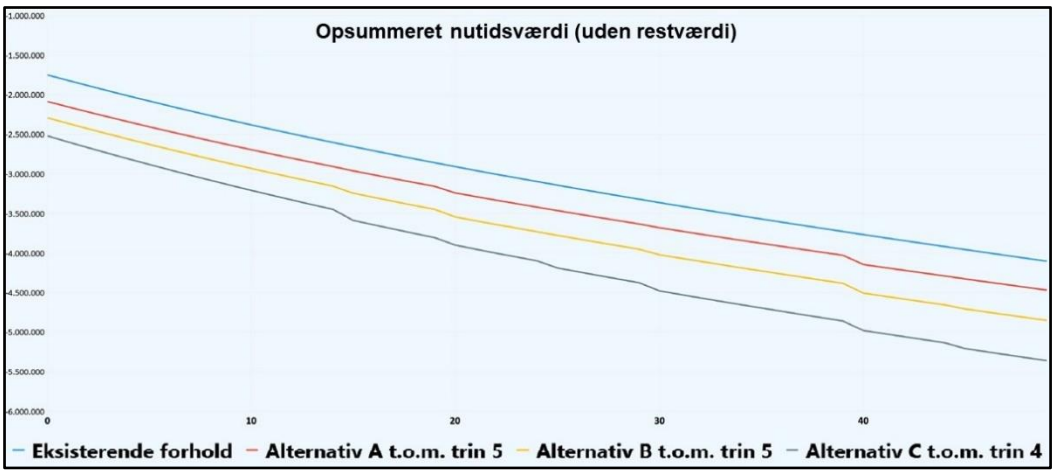
Resultaterne for årsomkostningerne for alternativer, der kan bringe huset i renoveringsklasse 1, fremgår af Tabel 52 nedenfor. Ved en sammenligning af det billigste og dyreste alternativ, er differencen -30.228 kr.

Tabel 52. Totaløkonomisk beregning af renoveringstrin der kan bringe huset i renoveringsklasse 1

Renoveringstrin der kan bringe huset i renoveringsklasse 1	Nutids-værdi pr. m^2	Nutids-værdi i alt	Års-omkostning pr. m^2	Års-omkostning i alt
Eksisterende forhold	-29.589	-3.905.748	-1.150	-151.800
Alternativ A m. solceller	-32.273	-4.260.036	-1.254	-165.528
Alternativ A m. udv. iso.	-33.767	-4.457.244	-1.312	-173.184
Alternativ B m. solceller	-35.113	-4.634.916	-1.365	-180.180
Alternativ C m. solceller	-36.301	-4.791.732	-1.411	-186.252
Alternativ B m. udv. iso.	-36.614	-4.833.048	-1.423	-187.836
Alternativ C m. udv. iso.	-37.791	-4.988.412	-1.469	-193.908
Alternativ C m- indv iso.	-38.155	-5.036.460	-1.483	-195.756

Det bør bemærkes, at årsomkostningen for et bringe huset i renoveringsklasse 1 med alternativ C med udvendig isolering er -193.908 kr. hvor den er -198.528 kr. for at bringe huset i renoveringsklasse 2 med alternativ C. I afsnit 10.1 beskrives det, at investeringsprisen for at bringe huset i renoveringsklasse 1 med alternativ C med udvendig isolering er 222.034 kr. dyrere end at bringe huset i renoveringsklasse 2 med alternativ C. En øget energibesparelse betyder dermed, at det dyreste af de to alternativer er billigst over en 50- årig beregningsperiode.

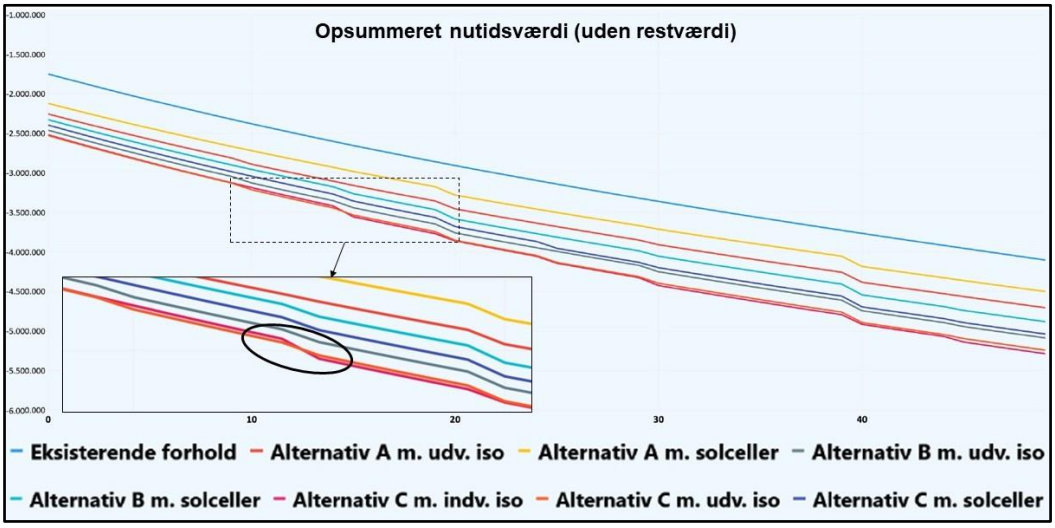
Den vandrette akse på Figur 17 viser årene fra 0 til 50 i beregningsperioden. Den lodrette akse viser den opsummerede nutidsværdi, uden restværdi. Forløbene for de opsummerede nutidsværdier for de tre alternativer, der kan bringe huset i renoveringsklasse 2, er stort set parallelle. Det viser dermed, at alternativ A til en hver tid over beregningsperioden er det billigste alternativ. Punkterne hvor kurverne ”knækker”, er tidspunkter hvor der sker udskiftninger, eksempelvis udskiftning af vinduer og yderdøre efter 40 år.



Figur 17. Opsummeret nutidsværdi (uden restværdi) for alternativer der kan bringe huset i renoveringsklasse 2

Nedenfor viser Figur 18, at de opsummerede nutidsværdier for alternativer, der kan bringe huset i renoveringsklasse 1, ligeledes har et parallelt forløb for de forskellige alternativer. Dog er der tidspunkter igennem beregningsperioden, hvor alternativ C med indvendig isolering og alternativ C med udvendig isolering krydser hinanden. Det betyder, at løsningen med indvendig isolering f.eks. har en lavere nutidsværdi fra år 3 til 12, hvor det derefter skifter til at løsningen med udvendig efterisolering har en lavere nutidsværdi en periode derefter.

Graferne i Figur 17 og Figur 18 fremgår ligeledes af I bilag 18 og 19.



Figur 18. Opsummeret nutidsværdi (uden restværdi) for alternativer der kan bringe huset i renoveringsklasse 1

10.3.1 Følsomhedsanalyse for energipris

Historisk set varierer energipriser over tid, derfor kan det være svært at fastsætte et præcist prisniveau for fremtiden. *"Alene i 2021 er prisen på naturgas og el steget med hhv. 206 pct. Og 149 pct. Årsagen til de rekordhøje energipriser er en kombination af blandt andet den økonomiske genopretning ovenpå COVID-19, pres på gasudbuddet, vejrforhold samt stigende kvotepris"* (Dansk industri, 2022).

Da energipris indgår i de totaløkonomiske beregninger, undersøges det hvor følsomme resultaterne er af priserne på fjernvarme. Hvis højere eller lavere fjernvarmepriser flytter på rækkefølgen af resultaterne i Tabel 52, er beslutningsgrundlaget usikkert, da det påvirkes af fjernvarmepriserne. Følsomhedsanalysen udføres på alternativerne A, B og C med de afslutningsmuligheder, der kan bringe huset i renoveringsklasse 1.

Der beregnes ikke på følsomhed i forhold til udsving på elprisen, da variationen i elbehovet er beskedent i forhold til variationen på varmebehovet iht. Tabel 48, afsnit 7.7. Derudover vil der opstå mange kombinationsmuligheder i forhold til de to variabler - fjernvarmepris og elpris.

I perioden 2014 – 2019 var den gennemsnitlige pris på landsplan 795,17 kr. inkl. Moms pr. MWh fjernvarme for et standardhus på 130 m^2 med et årligt varmeforbrug på 18,1 MWh inkl. Faste og variable bidrag. I denne periode var der en forskel på den højeste og laveste årlige gennemsnitspris på ca. 150 kr. pr. MWh. (Forsyningstilsynet, 2022).

På landsplan er der ligeledes en variation i priserne på fjernvarme, hvilket fremgår af opgørelsen fra Forsyningstilsynet for fjernvarmepriserne pr. 3. august 2021 fra 398 fjernvarmeværker fra (Forsyningstilsynet, 2022). I Tabel 53 fremgår prisen pr. MWh inkl. Moms uden faste og variable bidrag. I denne prisopgørelse er prisen 507,00 kr. pr. MWh ved forsyningsselskabet *(Din forsyning)*, der forsyner huset i dette projekt. Fjernvarmeprisen der foreløbigt er anvendt i de totaløkonomiske beregninger er 650 kr. inkl. moms pr. MWh.

Tabel 53. Fjernvarmepriser pr. 3. august 2021

Værdi	**Pris pr. MWh [kr.]**
Minimumværdi	142,14
1. kvartil (Q1), (25%)	427,50
Median	500,00
2. kvartil (Q2), (75%)	591,25
Maksimumværdi	993,75

I Tabel 54 nedenfor sammenlignes årsomkostningerne fra de oprindelige totaløkonomiske beregninger med resultater af beregninger, hvor der er beregnet med fjernvarmepriser for 1. kvartil, 2. kvartil fra tabellen ovenfor samt prisen fra forsyningsselskabet Din forsyning. Beregningerne fremgår af bilag 20, 21 og 22. Resultaterne viser, at rækkefølgen af de enkelte alternativer ikke ændrer sig. Differencen mellem dem varierer heller ikke væsentligt i forhold til den oprindelige beregning. Det betyder, at de totaløkonomiske beregninger ikke er specielt følsomme over for variationer i fjernvarmeprisen på landsplan.

Tabel 54. Resultater af følsomhedsanalyse vedr. fjernvarmepriser

Renoveringstrin der kan bringe huset i renoveringsklasse 1	**Årsomkostning i alt**			
	Fjernvarmepris pr. MWh incl. moms [kr.]			
	650,00 *(standard)*	**427,50** *(Q1)*	**591,25** *(Q2)*	**507,00** *(Din forsyning)*
Eksisterende forhold	-151.800	-145.992	-150.216	-148.104
Alternativ A m. solceller	-165.528	-162.624	-164.736	-163.680
Alternativ A m. udv. iso.	-173.184	-170.808	-172.524	-171.600
Alternativ B m. solceller	-180.180	-177.144	-179.256	-178.200
Alternativ C m. solceller	-186.252	-183.744	-185.592	-184.668
Alternativ B m. udv. iso.	-187.836	-185.328	-187.176	-186.252
Alternativ C m. udv. iso.	-193.908	-191.796	-193.380	-192.588
Alternativ C m- indv iso.	-195.756	-193.380	-195.096	-194.304

10.3.2 Følsomhedsanalyse for kalkulationsrente

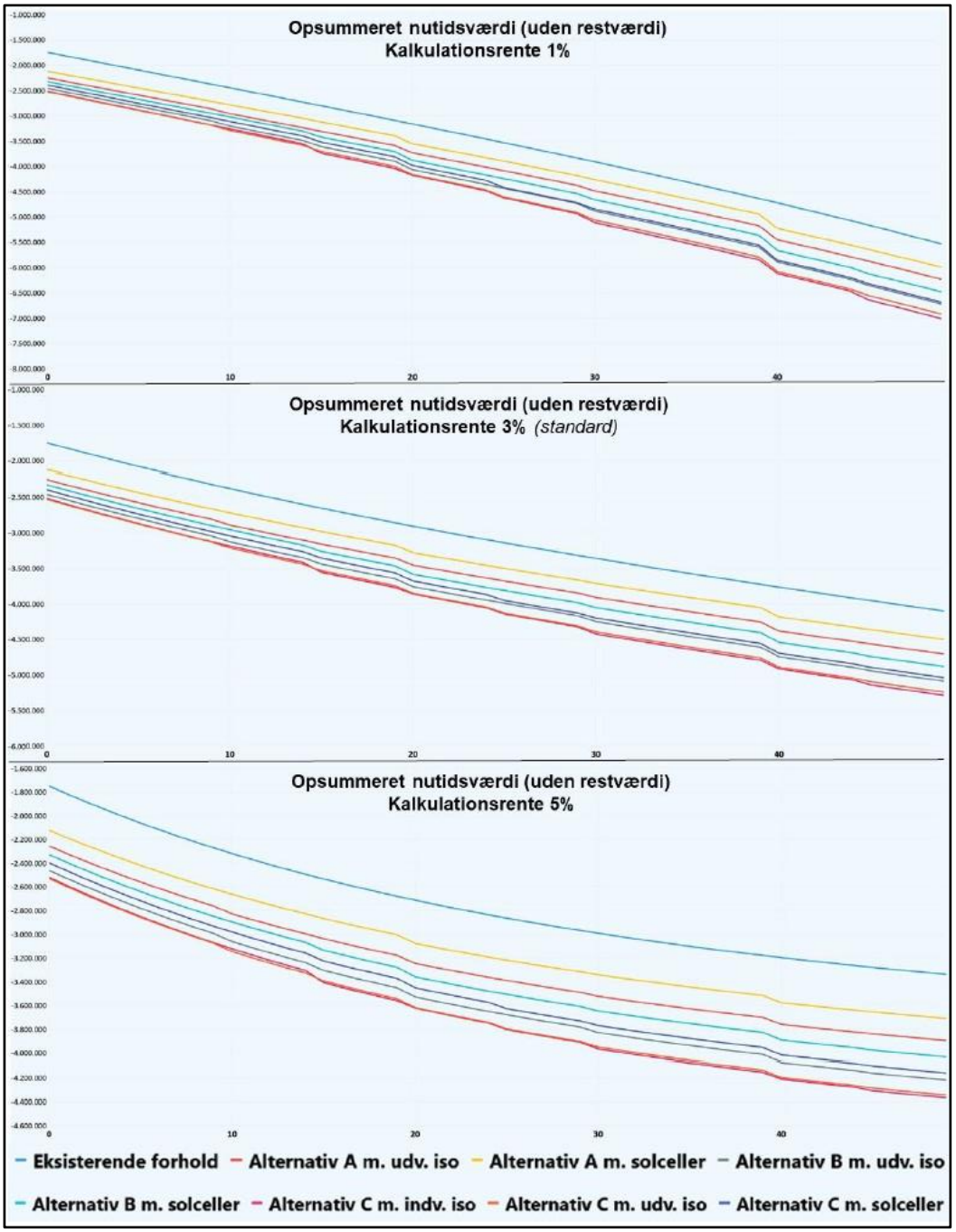
I publikationen *"Introduktion til LCC på bygninger" beskrives det, at " Det er ikke alt, som er lige vigtigt i en totaløkonomisk analyse. Erfaringsmæssigt er de vigtigste faktorer i prioriteret rækkefølge: 1. Kalkulationsrente og prisudvikling. 2. Levetider og genopretningsprocent. 3. Drift- og vedligeholdsdata for de konkrete løsninger"* (Haugbølle, 2016). Kalkulationsrenten betegner den omregningsfaktor, der anvendes ved beregning af nutidsværdien. Jo højere rente, jo lavere nutidsværdi.

I de totaløkonomiske beregninger, der allerede er udført, er der anvendt en kalkulationsrente på 3%. For at vurdere, hvor sikker de totaløkonomiske beregninger er som beslutningsgrundlag, i forhold till variationer i kalkulationsrente, er alternativerne A, B og C med de afslutningsmuligheder der kan bringe huset i renoveringsklasse 1, beregnet med en kalkulationsrente på 1% og 5%. Beregningerne fremgår af bilag 17, 23 og 24.

Tabel 55. Resultater af følsomhedsanalyse vedr. kalkulationsrente

Renoveringstrin der kan bringe huset i renoveringsklasse 1	**Nutidsværdi i alt [kr.] Kalkulationsrente**		
	1%	**3%** *(standard)*	**5%**
Eksisterende forhold	-5.013.756	-3.905.748	-3.263.172
Alternativ A m. solceller	-5.352.996	-4.260.036	-3.618.252
Alternativ A m. udv. iso.	-5.570.664	-4.457.244	-3.800.676
Alternativ B m. solceller	-5.822.916	-4.634.916	-3.939.012
Alternativ C m. solceller	-6.029.496	-4.791.732	-4.067.052
Alternativ B m. udv. iso.	-6.042.168	-4.833.048	-4.122.096
Alternativ C m. udv. iso.	-6.247.032	-4.988.412	-4.248.816
Alternativ C m- indv iso.	-6.344.976	-5.036.460	-4.272.576

Den gennemsnitlige nutidsværdi med 5% i kalkulationsrente er ca. 33% lavere end med en kalkulationsrente på 1%. Jo højere kalkulations- eller diskonteringsrenten er, jo mindre vil værdien i dag være af penge, der betales i fremtiden. Resultaterne viser ligeledes, at kalkulationsrenten har en betydning for, hvor sikker de totaløkonomiske beregninger er som beslutningsgrundlag. Figur 19 nedenfor viser, at jo lavere kalkulationsrenten er, jo mindre difference er der på den opsummerede nutidsværdi mellem de forskellige alternativer. Med en kalkulationsrente på 1% er udviklingen næsten lineær gennem beregningsperioden, og der sker flere "krydsninger" på beregningsforløbet end ved en kalkulationsrente på 3%. Når de enkelte alternativer ligger tæt gennem hele beregningsperioden, skal der ikke mange usikkerheder til, før det som blev betragtet som mest rentabelt ikke er det mest rentable valg.



Figur 19. Opsummeret nutidsværdi (uden restværdi) med kalkulationsrenter på 1, 3 og 5%

11 Diskussion

I afsnit 7.7 fremgår det, at renoveringstiltagene, der kan bringe huset i renoveringsklasse 2, giver en gennemsnitlig reduktion på 68,4 kWh/m^2 år for det samlede energibehov med primær energifaktorer, hvilket svarer til ca. 47%. Varmebehovet til bygningsdrift er gennemsnitligt reduceret med 79,5 kWh/m^2 år, hvilket svarer til ca. 48%, mens elbehovet er gennemsnitligt reduceret med 0,7 kWh/m^2 år.

Renoveringstiltagene, der kan bringe huset i renoveringsklasse 1, giver en gennemsnitlig reduktion på 86,2 kWh/m^2 år for det samlede energibehov med primær energifaktorer, hvilket svarer til ca. 59%. Varmebehovet til bygningsdrift er gennemsnitligt reduceret med 92,7 kWh/m^2 år, hvilket svarer til ca. 56%, mens elbehovet er gennemsnitligt reduceret med 1,1 kWh/m^2 år.

Disse resultater samt øvrige resultater, der er præsenteret i nærværende rapport, er afhængige af, hvor sikkert beregningsgrundlaget er på virkeligheden. I Tabel 4 fremgår det bl.a., at 19,5 % af det dimensionerende transmissionstab udgøres af ventilationstab uden VGV (om vinteren). Der er regnet med en ventilationsrate ved naturlig ventilation på 0,3 l/s m^2 om vinteren for huset i dette projekt, hvilket med overvejende sandsynlighed er for lavt i forhold til virkeligheden, som beskrevet i afsnit 5.2. Hvis der var anvendt en ventilationsrate på 0,6 l/s m^2 om vinteren i beregningerne, ville det påvirke energibehovet i negativ retning med ca. 19 %. Denne betragtning bakkes op af følgende citat: *"Luftutætheder i klimaskærmen anslås at øge energiforbruget med 20-30 % i forhold til korrekt udførte bygninger. Jo mere velisoleret en bygning er, jo større relativ betydning får klimaskærmens tilstrækkelige lufttæthed på bygningens samlede energiforbrug"* (Rasmussen & Nicolajsen, 2007).

Ud over ventilationsraten i huset har en gennemsnitlig fremløbstemperatur og afkølingen på fjernvarmevandet også en betydning på det samlede energibehov, jo lavere fremløbstemperatur, jo mindre er varmetabet fra installationerne. Med en frem- og returløbstemperatur på 60 og 30 °C frem for 70 og 40 °C ville det samlede energibehov være ca. 3% lavere ved husets eksisterende forhold.

Samlet set er beregningerne behæftet med et antal forhold, der hver især bidrager til usikkerheder i resultaterne. Derfor bør de enkelte forhold afvejes i forhold til, hvor følsomme de gør de samlede resultater. Ved at sammenholde det ovenfor beskrevne, ses det tydeligt, at ventilationsraten påvirker de samlede resultater i større grad end fjernvarmevandets frem- og returløbstemperatur.

Samtidigt bør det overvejes, hvorfor der beregnes på energibesparende tiltag. Er det for at eftervise at lovgivningsmæssige krav overholdes, eller er det for at beregne en besparelse på bygningsdrift over for en bygningsejer? Med dette in mente viser beregningerne i afsnit 8 vedr. pre- og reboundeffekter tydeligt, at gennemsnitstemperaturen indendørs har en stor betydning for resultatet for en eventuel besparelse i bygningsdrift. Ved eftervisning af lovmæssige krav, skal der anvendes en indendørstemperatur på 20 °C, men den menneskelige adfærd og behov gør, at boliger opvarmes til vidt forskellige temperaturer indendørs.

Beboeradfærd og døgnrytme spiller også ind på, hvornår beboerne anvender el. Resultaterne for produktionen af el fra solcelleanlægget er i Be18 beregnet som en værdi pr. m^2 pr. år. Der er derfor ikke taget hensyn til, i hvilken grad husets beboere kan anvende den mængde el, der ikke bruges på bygningsdrift, da deres forbrugsmønster

måske ikke passer sammen med tidspunkterne, hvor solcelleanlægget producere el. I de totaløkonomiske beregninger, er der regnet med at den overskydende el, der ikke bruges på bygningsdrift, sælges til el-nettet, og derefter købes den el, der skal bruges på forbrug. Denne opdeling i beregningerne kunne være fordelt anderledes. Det ville dog være en variabel, da forbrugsmønstre ændrer sig over tid. Alternativt kunne der være regnet med et solcelleanlæg med batteri, som kunne levere den samlede el-produktion, når der er behov for el.

Beboeradfærden påvirker ligeledes indeklimaet i et hus. Det atmosfæriske, der beskriver luftkvaliteten og termiske indeklima, som beskriver temperatur og trækforhold, er meget afhængig af, hvor godt et hus ventileres. I alternativ A og B er der regnet med naturlig ventilation, dog er der i alternativ B regnet med mekanisk udsugning i bryggers, bad og toilet. Derved er der sat nogle forudsætninger for beregningerne af energibesparelse og termisk indeklima, som er afhængige af beboernes adfærd. I alternativ C er der beregnet med mekanisk ventilation, som bidrager til et jævnt luftskifte. Med et jævnt luftskifte bliver luften hele tiden skiftet i huset, og der kommer ikke store udsving i det atmosfæriske og termiske indeklima. Derimod kan der med naturlig ventilation være større variationer i luftkvaliteten og temperaturen i huset.

Ved sammenligning af alternativ A, B og C med solceller i afsnit 7.7 ses, at varmebehovet med mekanisk ventilation et ca. 15,5% lavere med mekanisk ventilation end med naturlig ventilation, men el-behovet er ca. 2,15 kWh/m^2 år højere med mekanisk ventilation end med naturlig ventilation. Det samlede energibehov med primær energifaktorer er ca. 14% lavere ved alternativ C med mekanisk ventilation i forhold til alternativ A og B med naturlig ventilation. Set ud fra perspektivet vedr. energibesparelse kan det bedst betale sig at anvende mekanisk ventilation. Sammenholdes det med et mere stabilt atmosfærisk og termisk indeklima, er det klart at foretrække mekanisk ventilation.

Det er dog ikke uden omkostninger at etablere mekanisk ventilation. I dette projekt er etableringsomkostningerne sat til 68.750 kr. incl. moms. Dertil kommer udgifter til vedligehold og drift af ventilationsanlægget. Den primære forskel på alternativ B og C med solceller, er at ventilationen i alternativ C er mekanisk. Ved at sammenholde årsomkostningerne for alternativ B og C med solceller, ses det i afsnit 10.3 at alternativ C er ca. 6.000 kr. højere end alternativ B. Disse resultater viser, at besparelsen på varmebehovet ikke kan modsvare den øgede investering. Derimod må værdien af at investere i et mekanisk ventilationsanlæg sættes i et forbedret atmosfærisk og termisk indeklima. Den værdisætning må være op til den enkelte, da hvert menneske oplever indeklimaet forskelligt.

I forbindelse med renoveringen af huset, ændres der på en række forudsætninger for konstruktionernes sundhed samt indeklimaet. I afsnit 9 er et antal områder behandlet, som kan give bygningsfysiske udfordringer. Det er eftervist, at de enkelte renoveringstiltag er bygningsfysiske forsvarlige, med de beregningstekniske forudsætninger, der er taget. Beboeradfærden er også i dette tilfælde et parameter i forhold til bygningsfysiske udfordringer, da adfærden påvirker indeklimaet, og indeklimaet påvirker konstruktionerne. Eksempelvis i forhold til at bibeholde den eksisterende alu-kraftfolie i forbindelse med efterisolering af loftet, som beskrevet i afsnit 9.1. Hvis fugtbelastningen indendørs f.eks. stiger på grund af manglende ventilation og tøjtørring indendørs, stiger den relative fugtighed i loftkonstruktionen, og det kan skabe kritiske forhold. Hvis beboerne har en adfærd, der giver hen høj relativ luftfugtighed, og samtidig har en lavere temperatur indendørs end den i beregningerne forudsatte, kan den relative

luftfugtighed nå et niveau, hvor den kan medvirke til skimmelvækst, som kan medføre helbredsproblemer. Dette kan eksempelvis være i forbindelse med indvendig efterisolering.

Lige såvel som beboeradfærd er en ubekendt og variabel faktor i beregningerne for energibesparelser og bygningsfysiske forhold, er de klimatiske forhold udendørs det samme. I IPCC's sjette hovedrapport står der bl.a., at temperaturen stiger. Dette vil påvirke energibehovet til opvarmning samt øge behovet for ventilation i huset. Igennem afsnit 7 beskrives det flere gange, at efterisolering medvirker til mere overtemperatur i rum. Dette faktum kan medføre, at det i fremtiden er mere rentabelt at isolerer mindre for at spare på ventilation eller køling.

Ud over en stigning i temperaturen vil nedbørsperioderne blive kortere, men kraftigere, samtidigt vil vindhastighederne stige (Miljøministeriet / Miljøstyrelsen, 2022). Hvilken betydning klimaforandringerne har for husets konstruktioner, levetider og omkostninger vedligehold er uvis. Ved en vurdering af de totaløkonomiske omkostninger kunne dette indgå som en parameter i en følsomhedsanalyse. Ved anvendelse af solceller bruges solen til at producere el. Derfor er klimaændringer ligeledes et parameter, der kan påvirke beregningerne, da produktionen er afhængig af antallet af soltimer samt hvor overskyet der er.

Emnerne, som er beskrevet ovenfor, viser, at der er mange usikkerheder forbundet med beregning af energibehov. I de totaløkonomiske beregninger er der ligeledes et antal usikkerheder, som f.eks. energiprisen og kalkulationsrenten som beskrevet i afsnit 10.3.1 og 10.3.2. Følsomhedsanalysen for energiprisen i denne rapport, er beregnet på fjernvarmeprisernes forskelle på landsplan, som viste at rækkefølgen for størrelsen på årsomkostningerne for de enkelte alternativer ikke ændrede sig. I beregningerne er der anvendt en gennemsnitlig prisudvikling for fjernvarme på 1%. Prisudviklingen i det enkelte forsyningsområde kan variere meget år for år, hvilket specielt gør sig gældende i år for ca. 200.000 forbrugere, hvor fjernvarmeværket anvender naturgas - cirka halvdelen af dem med en stigning på 20% (Ingvorsen, 20221). For de øvrige energiformer, kan der ligeledes være store variationer i priserne år for år. Det er derfor vigtigt for den enkelte forbruger at betragte totaløkonomi over en længere beregningsperiode, og ikke går i panik efter få år. Ved anvendelse af korte beregningsperioder, vil variationer i energipriser give anledning til større usikkerhed og følsomhed i beregningerne.

Kalkulationsrenten er ligesom energipriser en usikkerhedsfaktor, som er præget af inflationen, der er et produkt af udviklingen i samfundet. *"Eksempelvis er der usikkerhed om den fremtidige teknologiske udvikling, ligesom usikkerhed om klimaforandringer eller potentielle naturkatastrofers påvirkning på økonomien også kan spille en rolle for afkastet på kapital i fremtiden"* (Finansministeriet, 2022). I dette projekt er der anvendt en kalkulationsrente på 3%. Ved at anvende en kalkulationsrente på 1% forbliver rækkefølgen på de enkelte alternativer den samme efter 50 år, men differencerne på nutidsværdierne er meget mindre end ved beregning med 5%. Samtidigt skifter flere alternativer plads gennem beregningsperioden med en kalkulationsrente på 1% end ved 5%. Det betyder at jo lavere kalkulationsrente og jo kortere beregningsperioden er, jo mere usikkert er beslutningsgrundlaget.

Ved at betragte forholdet mellem de eksisterende forhold, og de enkelte alternativer i de totaløkonomiske beregninger i dette projekt, står det klart, at den økonomiske besparelse på bygningsdrift ikke modsvarer investeringen i at energirenovere. Summen af dette projekt kan formuleres på samme måde som i et lignende projekt: *"En del af gevinsten ved energirenoveringen er altså ikke besparelser men et bedre hus at bo i. Energirenovering betaler sig desuden især, når man alligevel skal udskifte bygningsdele. Endelig må man forvente, at husejerens økonomiske sårbarhed mindskes, når udgifterne flyttes fra energi til lån, da vi kan regne med stigende energiafgifter fremover. Fordelene ved energirenovering kan altså ikke udelukkende gøres op i penge – det er en kombination af flere faktorer"* (Realea A/S al. et, 2010).

Flere undersøgelse viser samtidig at energirenovering er en gevinst for salgsprisen og kan genere et hurtigere salg. En analyse fra Finans Danmark viser, at et typisk hus på 140 kvm kan sælges for godt 160.000 kr. mere, hvis det er blevet forbedret fra energimærke E til D. Derudover viser analysen, at i 2018 blev huse i energimæssig god stand i gennemsnit solgt på 136 dage, mens huse i energimæssig dårlig stand blev solgt på 205 dage (Racina, 2022). Denne analyse bakker op om rapporten *"Sammenhæng mellem energimærkning og salgspris"* fra Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet, 2013.

I dette projekt har huset med de eksisterende forhold energimærke D. For alternativerne der kan bringe huset i renoveringsklasse 2, er det gennemsnitlige energimærke B. For alternativerne der kan bringe huset i renoveringsklasse 1, er det gennemsnitlige energimærke A 2010. Beregningerne er lavet iht. Håndbogen for energikonsulenter (Energistyrelsen, 2022). Energirenoveringen vil medføre en stigning i kvadratmeterpris på ca. 834 kr./m^2 jf. den ovenfor nævnte rapport (Hansen, Jensen, & Kragh, 2013). Det vil betyde en øget salgspris på ca. 110.000 kr. efter en energirenovering.

En sammenligning af to totaløkonomiske beregninger over 25 år for alternativ C med solceller, hvor der er indregnet salg efter de 25 år, viser at der er en årsomkostning med restværdi på -127.932 kr., hvor kvadratmeterprisen er 834 kr. højere end den eksisterende kvadratmeterpris svarende til købsprisen på 13.257 kr./m^2. Med en salgspris på 13.257 kr./m^2 er årsomkostningen med restværdi -130.951 kr. hvilket giver en reduktion i årsomkostningen med restværdi på 3.019 kr. Beregningen fremgår af bilag 25.

Over de seneste år har der været en tendens til at rive det gamle hus ned og bygge nyt, *"alene i 2016 måtte omkring 1.000 villaer, bungalower og parcelhuse lade livet for at give plads til nye typehuse"* (Nørgaard, 2022). Årsagerne til at ældre huse ofte rives ned, er at der praktisk taget ikke er ubebyggede byggegrunde til salg i de attraktive bydele. Samtidig lever en stor del af de gamle huse ikke op til de ønsker, som mange børnefamilier har til plads, indretning og komfort (Nørgaard, 2022). Der er ofte mange uforudsete udgifter forbundet med renovering af et ældre hus, da de bagved liggende konstruktioner eller installationer ikke er som forventet. Ifølge Jørgen Munksgaard Rasmussen, boligøkonomisk ekspert i Videncentret Bolius, koster det 17.000-23.000 kr. inkl. moms pr. m^2 at renovere et gammelt hus. Stuer og værelser er billigere – køkken og bad lidt dyrere. Vælger man at rive huset ned og bygge et nyt typehus, kan man få en fast pris. Her koster det typisk 14.000-15.000 kr. pr. m^2 (Nørgaard, 2022).

Huskøbere må ofte gå på kompromis, hvis de ønsker at beholde det købte hus og renovere det, det kan f.eks. være i forhold til rumdisponering, varmefordelingsanlæg, ventilationsforhold osv. Der kan samtidig også være fordele ved at bevare det gamle hus, at det arkitektoniske udtryk og husets "sjæl" bevares. Fordelene ved at bygge et nyt hus

er bl.a., at det har et lavt varmetab, der er indbygget radonsikring, der er minimal vedligehold, der er god komfort, rumdisponeringen er som ønsket osv.

Sammenlignes resultaterne i Be18 for alternativ C med solceller med et nyopført hus, der overholder det bygningsreglementets krav, er varmebehovet reduceret med 24,5 kWh/m^2 år. Reduceringen er sket ved at optimere terrændækkets U-værdi til 0,10 W/m^{2}K og ydervæggenes U-værdi til 0,12 W/m^{2}K. Beregningen fremgår af bilag 26. Ved en totaløkonomisk beregning over 50 år af opførsel af et nyt hus, sat op i mod alternativ C med solceller, giver det en forøgelse af årsomkostningen med restværdi på 18.841 kr. for opførslen af et nyt hus. I beregningerne indgår købet af det gamle hus, nedrivning, opførsel af et nyt hus til 14.500 kr. pr. m^2 samt advokathonorar. Beregningen fremgår af bilag 27. Denne sammenligning kan dog ikke overføres til andre projekter, da alle huse, ønsker, behov osv. er forskellige fra hus til hus, fra projekt til projekt.

I dette projekt er der regnet på energibesparelse vedr. bygningsdrift. Gennem de seneste år, er der blevet et større fokus på CO_2-aftrykket gennem hele bygningens livscyklus, lige fra udvinding af råstoffer til byggematerialer til genanvendelse og/ eller deponering. Bruges CO_2-aftrykket i argumentationen for valg af materialer og renoveringstiltag, er det ikke sikkert, at de tre alternativer med tilhørende trin og materialer, der er regnet på i dette projekt, ville være de bedste løsninger. Eksempelvis er der stor forskel på CO_2-aftrykket for solceller alt efter hvor de er produceret. Forskellen hænger ikke kun sammen med transport fra producenten til landet hvor de monteres, men også i forhold til hvordan råstofferne bliver udvundet, hvor tykke lagene i solcellerne er osv. Der er også forskel på CO_2-aftrykket for traditionelle isoleringsmaterialer, f.eks. stenuld og glasuld (Kanafani et. al., 2021). Sammenlignes CO_2-aftrykket for renovering med at rive ned og bygge nyt, viser en analyse at *"de negative klima- og miljømæssige effekter af at rive ned og bygge et nyt erstatningsbyggeri af samme størrelse er 45-55 procent større i CO2-regnskabet, end hvis der i stedet gennemføres en markant renovering af bygningen"* (Autrup, 2022).

Forholdet mellem økonomi, vedligehold, æstetik, CO_2-aftryk osv. stiller den enkelte husejer, der står over for valget mellem renovering eller nybyggeri, i et dilemma, hvor den enkeltes præferencer kommer i spil. Dog må der foretages bygningsfysiske forsvarlige løsninger for *"kort sagt: Går det galt med bygningsfysikken, er god arkitektur, livscyklusanalyser og materiale- og ressourcebevidsthed ligegyldig. Opstår der skimmel i en bolig, er der ubalance mellem varme og fugt og bygningen, - og så er vi lige vidt. Og dette gælder både konventionelle og bæredygtige byggerier. Alternativet, som vi ser alt for ofte, kan blive langt dyrere: Nedrivning, genhusning og genopbygning af nye konstruktioner osv."* (Peuhkuri, 2022).

12 Konklusion

Gennem nærværende rapport er der via energitekniske beregninger fremsat et eksempel på, hvad der skal til for at føre et parcelhus fra 1971 til renoveringsklasse 1 og 2.

For at føre parcelhuset i renoveringsklasse 2, skal der skabes forbedringer på klimaskærmen, herunder udskiftning af vinduer og yderdøre, efterisolering af tagkonstruktionen, hulmursisoleres samt etableres mekanisk ventilation som i alternativ C. Hvis der ikke etableres mekanisk ventilation, som i alternativ A og B, skal varmefordelingsanlægget optimeres for at bringe huset i renoveringsklasse 2. Gennemsnitligt er det samlede energibehov reduceret med 68,4 kWh/m^2 år, varme- og elbehovet er gennemsnitligt reduceret med 79,5 og 0,7 kWh/m^2 år.

Ud over de ovenfor nævnte renoveringstiltag, er det nødvendigt, enten at isolere ydervæggene yderligere eller etablere et solcelleanlæg for at bringe huset i renoveringsklasse 1. De tre alternativer A, B og C er hver beregnet med en afslutning, hvor der enten efterisoleres indvendigt, efterisoleres udvendigt eller etableres solceller. For alternativ A og B med naturlig ventilation, kan de ikke bringe huset i renoveringsklasse 1 med indvendig efterisolering. Gennemsnitligt er det samlede energibehov reduceret med 86,2 kWh/m^2 år, varme- og elbehovet er gennemsnitligt reduceret med 92,7 og 1,1 kWh/m2 år.

Ved eftervisning af om huset overholder renoveringsklasse 1 eller 2 anvendes en gennemsnitlig temperatur på 20 °C indendørs. Den menneskelige adfærd gør, at temperaturen indendørs måske kan være lavere, når det opleves, at varmen suser ud gennem klimaskærmen, hvorimod der måske skues op for varmen, når det opleves, at huset holder godt på varmen. Dette kaldes pre- og reboundeffekter.

Ved beregninger, hvor der er anvendt en gennemsnitlig temperatur på 19 °C indendørs før renoveringen og en gennemsnitlig temperatur på 21 °C indendørs efter renoveringen, er besparelsen på varmebehovet 18,1 kWh/m^2 år lavere end ved beregningerne med 20 °C. Samlet set for hele huset er det 2389 kWh pr. år, som svarer til en besparelse på ca. 16,8% lavere end først antaget. Beregningerne er foretaget for alternativ C, trin 6 med udvendig efterisolering, som kan bringe huset i renoveringsklasse 1. Forandringer i elbehovet til bygningsdrift er maks. 0,1 kWh/m^2 år, og derfor ikke interessante for det samlede resultat.

De totaløkonomiske beregninger i denne rapport viser, at det generelt ikke kan betale sig, alene set ud fra et totaløkonomisk synspunkt, at investere flere penge her og nu i en energirenovering frem for at vælge en billigere løsning. Der er dog et tilfælde i de beregnede alternativer, hvor det kan betale sig, nemlig alternativ C med indvendig isolering og alternativ C med udvendig isolering. Den samlede pris for alternativ C med indvendig isolering er 769.609 kr. hvor den er 780.195 kr. for alternativ C med udvendig isolering. Årsomkostningerne i alt er -195.756 kr. for alternativ C med indvendig isolering, hvor den er -193.908 kr. for alternativ C med udvendig isolering. Energiprisen for fjernvarme har ikke en betydning for rækkefølgen de enkelte alternativer præsentere sig på efter en totaløkonomisk beregning over 50 år, og beregningerne viser sig ikke specielt følsomme over for energiprisen. Derimod viser det sig, at de totaløkonomiske beregninger er mere følsomme over for kalkulationsrenten, hvilket kan gøre beslutningen mellem to alternativer sværere. Samlet set bør den enkelte husejer, der står over for en energirenovering, tage flere overvejelser i spil, f.eks. økonomisk formåen, er det med salg for øje og krav til indeklima.

13 Perspektivering

Som følge af arbejdet med dette projekt, er der opstået nye og relevante spørgsmål. Disse spørgsmål tager afsæt i et antal forhold, som kunne være interessante at undersøge.

I dette projekt er der regnet på et hus, der forefindes i energiteknisk original stand. Der er dog mange parcelhuse, som har fået skiftet vinduer, blevet efterisoleret eller hvor der er sket andre energibesparende tiltag, og derfor har en bedre energimæssig stand end da de blev bygget. Det kunne derfor kunne det være interessant at undersøge effekten af en yderligere energioptimering, og i hvilken grad det er rentabelt.

Da CO_2-udledning fra byggeri stammer fra hele livscyklussen - lige fra råstofudvinding til genbrug og/eller deponering, kunne der være interessant at undersøge hvilket CO_2-aftryk en energirenovering har i forhold til et nybygget hus ved at inddrage en livscyklusanalyse i beregningerne.

For at få en mere realistisk beregning af energibesparelse, kunne det være interessant at udføre beregninger på baggrund af målinger i et eller flere casehuse, da det har det vist sig, at resultaterne af energitekniske beregninger er mere eller mindre følsomme i forhold til temperatur indendørs, ventilationsforhold, temperatur på fjernvarmevandet osv.

I dette projekt er renoveringsklasse 1 og 2 sat som mål, og derefter er de økonomiske omkostninger beregnet. Virkeligheden er dog for mange mennesker, at de går i banken og kan låne et givent beløb til energirenovering, for derefter at igangsætte arbejdet. Denne rækkefølge gør det interessant at undersøge, hvor stor en energibesparelse der kan opnås for et givent beløb på den smarteste måde, hvor rumdisponering, dagslysforhold osv. tænkes ind i en helhedsorienteret renovering.

14 Kilde- og litteraturfortegnelse

Aggerholm, S. (2018). *SBi-anvisning 213, Bygningers energibehov.* København: Statens byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.

Autrup, L. (16. maj 2022). *arkitektforeningen.dk*. Hentet fra Rambøll-rapport: Klimamæssigt kan det altid betale sig at renovere: https://arkitektforeningen.dk/nyheder/ramboell-rapport-klimamaessigt-kan-det-altid-betale-sig-at-renovere/

Bergsøe, N. C. (2015). *Niels.* København: Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.

Blocon A. (27. marts 2022). *HEAT2 – Varmeoverførsel i to dimensioner*. Hentet fra Buildingphysics.com: https://buildingphysics.com/heat2-3/

Bolig- og Planstyrelsen. (26. marts 2022). *Bygningsreglementets vejledning om energiforbrug*. Hentet fra Bygningsreglementet.dk: https://bygningsreglementet.dk/Tekniske-bestemmelser/11/BRV/Energiforbrug/Kap-5_0

Bolig- og Planstyrelsen. (02. april 2022). *Bygningsreglementets vejledning om termisk indeklima og installationer til varme- og køleanlæg*. Hentet fra bygningsreglementet.dk: https://bygningsreglementet.dk/Tekniske-bestemmelser/19/Vejledninger/Termisk-indeklima

Bolig- og Planstyrelsen. (30. marts 2022). *Bygningsreglementets vejledning om ventilation*. Hentet fra Bygningsreglementet.dk: https://bygningsreglementet.dk/Tekniske-bestemmelser/22/Vejledninger/Generel_vejledning

Bolig- og Planstyrelsen. (26. marts 2022). *Energiforbrug (§250 - §298)*. Hentet fra Bygningsreglementet.dk: https://bygningsreglementet.dk/Tekniske-bestemmelser/11/Krav

Brandt, E. (2013). *SBi-anvisning 224, fugt i bygninger.* København: Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg universitet.

Build, Aalborg universitet. (10. April 2022). *Rettelsesblad til SBi-anvisning 213, Bygningers energibehov. 6. udgave 2018.* Hentet fra energysystems.dk/: https://www.energysystems.dk/media/1650/rettelsesblad-til-sbi-anvisning-213-6udgave.pdf

BYG-DTU. (1999). *Ruder og vinduers energimæssige egenskaber, Kompendium 2, forenklede metoder til bestemmelse af energimærkningsdata.* Lyngby: Danmarks tekniske universitet.

Danmarks statestik. (30. April 2022). *statistikbanken.dk*. Hentet fra ENERGI1: Priser på elektricitet for husholdningskunder efter årsforbrug, prisdefinition og energienhed: https://www.statistikbanken.dk/20721

Dansk industri. (30. april 2022). *danskindustri.dk*. Hentet fra Rekordhøje energipriser: https://www.danskindustri.dk/brancher/di-energi/nyhedsarkiv/nyheder/2021/10/rekordhoje-energipriser/

Dansk standard. (2020). *DS 418:2011 + Till.1:2020.* København: Fonden Dansk Standard.

EG. (28. marts 2022). *EG Sigma*. Hentet fra eg.dk: https://eg.dk/it/kalkulation-og-opmaaling/eg-sigma/?gclid=EAIaIQobChMIqoi7oqzo9gIVI_bVCh1AoAG1EAAYASAAEgIf0vD_BwE

Energistyrelsen. (01. april 2022). *Bilag 4: Energimærkning af eksisterende bygninger*. Hentet fra hbemo.dk: https://hbemo.dk/haandbog-for-energikonsulenter-hb2021-gaeldende/bilag-4-energimaerkning-af-eksisterende-bygninger

Energistyrelsen. (23. marts 2022). *Dansk klimapolitik*. Hentet fra ens.dk: https://ens.dk/ansvarsomraader/energi-klimapolitik/fakta-om-dansk-energi-klimapolitik/dansk-klimapolitik

Energistyrelsen. (19. april 2022). *Dit elforbrug*. Hentet fra sparenergi.dk: https://sparenergi.dk/forbruger/el/dit-elforbrug

Energistyrelsen. (23. marts 2022). *Find statistik på bygningers energimærker*. Hentet fra SparEnergi.dk: https://sparenergi.dk/forbruger/vaerktoejer/find-statistik-paa-danmarks-energimaeker

Energistyrelsen. (16. maj 2022). *hbemo.dk*. Hentet fra Skala for boliger: https://hbemo.dk/vejledning/energimaerkeskala/skala-for-boliger

Finansministeriet. (16. maj 2022). *fm.dk.* Hentet fra Dokumentationsnotat – den samfundsøkonomiske diskonteringsrente: https://fm.dk/media/18371/dokumentationsnotat-for-den-samfundsoekonomiske-diskonteringsrente_7-januar-2021.pdf

Forsyningstilsynet. (30. April 2022). *forsyningstilsynet.dk*. Hentet fra Fjernvarmestatistik: https://forsyningstilsynet.dk/tal-fakta/priser/fjernvarmestatistik/

Forsyningstilsynet. (30. April 2022). *forsyningstilsynet.dk*. Hentet fra Priser pr. 3. august 2021: https://forsyningstilsynet.dk/tal-fakta/priser/varmepriser/priser-pr-3-august-2021

Fraunhofer IBP. (28. marts 2022). *WUFI Pro*. Hentet fra wufi.de: https://wufi.de/en/software/wufi-pro/

Halsnæs Vandforsyning. (19. april 2022). *Hvad er et normalt vandforbrug*. Hentet fra https://www.huvand.dk/: https://www.huvand.dk/spoergsmaal-og-svar/hvad-er-et-normalt-vandforbrug/

Hansen, A. R., Jensen, O. M., & Kragh, J. (2013). *Sammenhæng mellem energimærkning og salgspris.* København: Statens Byggeforskningsinstitut.

Hansen, T. K. (2021). *Indvendig efterisolering af murværk, Erfaringsblad (31) 21 11 24.* København K: Fonden BYG-ERFA.

Hansen, T., & et al. (2021). *Trykprøvning af bygninger - Baggrund.* Teknologisk Institut.

Haugbølle, K. (2016). *Introduktion til LCC på bygninger.* København K: Energistyrelsen.

Havinga, L., & Schellen, H. (2018). *Applying internal insulation in post-war prefab housing: Understanding and mitigating the hygrothermal risks.* Eindhoven: Elsevier.

Ingvorsen, E. S. (16. Maj 20221). *dr.dk*. Hentet fra Energipriserne på himmelflugt: I dag vil flere partier kræve 2,7 milliarder til danskerne: https://www.dr.dk/nyheder/penge/energipriserne-paa-himmelflugt-i-dag-vil-flere-partier-kraeve-27-milliarder-til

Kanafani et. al., K. e. (2021). *Klimaeffektiv renovering.* København SV: Institut for Byggeri, By og Miljø (BUILD), Aalborg Universitet.

Klavsen, J. N. (2011). *Efterisolering af hulmur- forundersøgelser og forudsætninger.* Gilleleje: Fonden BYG-ERFA.

Kragh, J., & Wittchen, K. (2010). *Danske bygningers energibehov i 2050.* Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut.

Miljøministeriet / Miljøstyrelsen. (23. marts 2022). *IPCC's sjette hovedrapport del 2*. Hentet fra Klimatilpasning: https://www.klimatilpasning.dk/aktuelt/nyheder/2022/februar/ipccs-sjette-hovedrapport/

Molio. (2022). *Introduktion, Molio prisdata.* Middelfart: Molio.

Molio. (28. marts 2022). *Prisdata*. Hentet fra molio.dk: https://molio.dk/produkter/digitale-vaerktojer/prisdata

Mortensen, L., & et al. (2018). *Branchevejledning for energiberegninger.* København SV: Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.

Møller, E. B. (2012). *SBi-anvisning 239, Efterisolering af småhuse- energibesparelser og planlægning.* Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.

Møller, E. B. (31. marts 2020). Er dampspærre nødvendig ved efterisolering af ventileret tagrum? *Bygge og anlægsavisen*.

Møller, Eva B. (2012). *SBi-anvisning 240, Efterisolering af småhuse - byggetekniske løsninger.* Hørsholm: Statens byggeforskningsinstitut.

Nørgaard, N. (16. maj 2022). *bolius.dk*. Hentet fra Gamle villaer rives ned og erstattes af nye: https://www.bolius.dk/gamle-villaer-rives-ned-og-erstattes-af-nye-45832

Peuhkuri, R. (16. maj 2022). *byggeri-arkitektur.dk*. Hentet fra Bæredygtigt byggeri brækker halsen uden bygningsfysikken: https://byggeri-arkitektur.dk/Baeredygtigt-byggeri-braekker-halsen-uden-bygningsfysikken

Racina, K. (16. maj 2022). *finansdanmark.dk*. Hentet fra Energirenoverede huse sælges hurtigere og til højere pris – men der er ikke nok af dem: https://finansdanmark.dk/nyheder/2020/energirenoverede-huse-saelges-hurtigere-og-til-hoejere-pris-men-der-er-ikke-nok-af-dem/

Rasmussen, T. V. (2016). *Radonsikring af eksisterende bygninger.* København SV: Statens byggeforskningsinstitut, Aalborg universitet.

Rasmussen, T. V., & Nicolajsen, A. (2007). *SBi-anvisning 214, Klimaskærmens lufttæthed.* Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut.

Realdania. (2017). *Energirenovering af den private boligmasse.* Realdania.

Realea A/S al. et. (2010). *Energiparcel, 4 eksempler på energirenovering af danskernes yndlingsbolig.* København: Realea A/S.

Regeringen. (2021). *Køreplan for et grønt Danmark.* København: Statsministeriet.

THEMA Consulting Group. (2013). *Rebound-, prebound og lock-in ved energieffektivisering i boliger.* Oslo: Husbanken.

Videncenter for Energibesparelser i Bygninger. (11. April 2022). *Renovering af fjernevarmeforsynet varmecentral*. Hentet fra byggeriogenergi.dk: https://byggeriogenergi.dk/etageejendomme/installationer/varmeinstallation/fjernvarme-varmecentral-renovering/

With, J. (2021). *Vand i tal.* Skanderborg: DANVA.